

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З КУРСУ
«ВАКУУМНА ТА ПЛАЗМОВА ЕЛЕКТРОНІКА»

КИЇВ НТУУ «КПІ»

2015

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «вакуумна та плазмова електроніка» для студентів факультету електроніки НТУУ «КПІ» усіх форм навчання /Уклад. Шмирьова Л.М., Слободян Н.В. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 113 с.

*Гриф надано Методичною радою факультету електроніки НТУУ «КПІ»
(Протокол №10/2015 від 26 жовтня 2015 р.)*

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З КУРСУ
«ВАКУУМНА ТА ПЛАЗМОВА ЕЛЕКТРОНІКА»
для студентів факультету електроніки НТУУ «КПІ» усіх форм навчання

Укладачі: *Шмирьова Людмила Миколіївна, канд. техн. наук., доц.
Слободян Ніна Вячеславівна, канд. техн. наук.*

Відповідальний
редактор: *Л.Д. Писаренко, д-р. техн. наук., проф.*

Рецензент: *І.Д. Шовкун.*

КИЇВ НТУУ «КПІ»

2015

ЗМІСТ

Загальні відомості.....	4
Лабораторна робота №1. Дослідження тліючого розряду.....	5
Лабораторна робота №2. Дослідження стабілітронів тліючого розряду.....	12
Лабораторна робота №3. Дослідження тиратронів тліючого розряду.....	21
Лабораторна робота №4. Дослідження цифрового індикаторного приладу.....	28
Лабораторна робота №5. Дослідження приладів дугового несамоствійного розряду.....	33
Лабораторна робота №6. Дослідження характеристик та параметрів ГПС-16...	51
Лабораторна робота №7. Дослідження вакуумного тріода.....	60
Лабораторна робота №8. Дослідження пентода.....	76
Лабораторна робота №9. Дослідження осцилографічної електронно-променевої трубки.....	86
Лабораторна робота №10. Фотоелектричні прилади.....	98
Перелік літератури.....	113

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

У цих методичних вказівках описані лабораторні роботи, які виконуються відповідно до навчальної програми курсу «Вакуумна та плазмова електроніка» студентами кафедри електронних приладів та пристроїв.

Мета виконання лабораторних робіт – закріпити і поглибити теоретичні знання, набуті на лекціях та під час самостійної роботи студентів, прищепити студентам навички роботи з контрольно-вимірювальною апаратурою при проведенні експериментальних досліджень і вміння обробляти данні, отримані в результаті експериментальних вимірювань.

В описі лабораторних робіт присутні короткі теоретичні відомості до кожної роботи, схема лабораторної установки, порядок виконання роботи і контрольні запитання. Наприкінці наведений перелік літератури, яку можна використовувати при підготовці до виконання курсу лабораторних робіт.

Перед виконанням кожної лабораторної роботи студент зобов'язаний вивчити основні теоретичні відомості за темою даної роботи використовуючи лекційний матеріал та рекомендовану літературу. Ознайомитись з описом лабораторного макета для дослідження приладу. Підготувати протокол для звіту по даній лабораторній роботі. В протоколі повинна бути вказана мета проведення лабораторної роботи, коротко описана схема вимірювань, підготовані таблиці для запису результатів.

Звіт по лабораторній роботі оформлюється на листах формату А4. Об'єм звіту по роботі складає 3 – 4 сторінки. До звіту входять протокол проведення роботи з результатами досліджень, розрахунки, що передумовлені програмою робіт, висновки по роботі, що містять аналіз отриманих результатів, порівняння їх з теоретичними передумовами, обговорення похибок вимірювань. Характеристики повинні бути накреслені на міліметровому папері у масштабі, який відповідає точності вимірювань.

Лабораторна робота №1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЛІЮЧОГО РАЗРЯДУ

Ціль роботи – ознайомитися з основними формами тліючого розряду та його параметрами.

Короткі теоретичні відомості

Фізичні процеси, що виникають у встановленому розряді, характеризуються розподілом поля в міжелектродному проміжку, чергуванням шарів світлового випромінювання вздовж його протяжності, розподілом напруженості (рис. 1.1.).

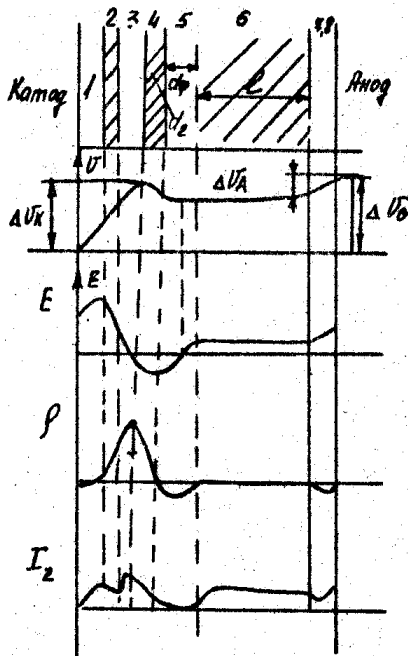


Рис. 1.1. Фізичні процеси у встановленому розряді.

За характером зміни кривої розподілу потенціалів нормальний тліючий розряд може бути розбитий на три основні частини: катодну d_k , стовп розряду l , анодну d_a .

За яскравістю світіння між катодною частиною та стовпом можуть бути виділені ще два проміжних шари (ділянки d_a та d_ϕ), що зв'язують катодну частину розряду з його стовпом.

Найбільш суттєва частина – катодна. Розряд може існувати тільки при наявності його катодної частини. Це реалізується в короткопроміжних приладах.

Найбільша зміна потенціалу має місце в катодній частині розряду. Рівень підйому потенціалу, що називається катодним падінням напруги U_k , забезпечує необхідну енергію іонів, що надходять з розряду та бомбардують катод, а також енергію електронів, що уходять від катода в катодну частину розряду та іонізують атоми газу.

На катоді відбувається електронно-іонна емісія. Електрони, прискорюються полем набирають спочатку енергію, достатню для збудження та іонізації. Процеси, що відбуваються на шляху руху електронів при їх взаємодії з атомами газу, відображаються в різних яскравостях світіння шарів газу в катодній частині розряду. Поблизу катода розташовується перша катодна темна ділянка 1, (см. рис. 1.1), перше катодне світіння 2, друга катодна темна ділянка 3, на які припадає основна частина падіння напруги. За ними йде яскрава ділянка, що світиться – негативне тліюче світіння 4. При тисках, що перевищують 1300 Па, які характерні для більшості індикаторних приладів тліючого розряду, ділянка 4 близько розташовується до катода, так що її світіння не дозволяє розрізнити більш слабе світіння ділянки 2. Тоді при аномальному тліючому розряді конфігурація ділянки 4 чітко повторює конфігурацію катода. Після ділянки 4 йде фарадеевський темний простір 5 та позитивний стовп 6. За анодним кінцем позитивного стовпа іноді йдуть ще темний простір 7 і анодне світіння 8.

Перераховані області міжелектродного проміжку в тліючому розряді можна розділити на плазмові, що характеризуються малою напруженістю поля E і приблизно рівними концентраціями позитивних і негативних зарядів (ділянки 4 – 6), та приелектродні з високою напруженістю електричного поля і значним просторовим зарядом (ділянки 1 – 3, 7 – 8).

Електрони, емітовані з катода, прискорюються сильним полем катодного темного простору. Але, цієї енергії недостатньо для збудження атомів газу, тому відсутні і процеси висвічування. У шарі 2 енергія електронів досягає і перевершує мінімальні рівні збудження. Тут відбуваються процеси збудження атомів з подальшим їх висвічуванням при нормалізації.

У шарі 3 енергія електронів перевищує рівень, відповідний максимуму

ймовірності збудження, тому інтенсивність збудження і висвітлення газу послаблюються. У шарі 4 вже відбувається інтенсивна іонізація газу і з'являється підвищена концентрація іонів і вторинних електронів. Процеси збудження і іонізації супроводжуються яскравим висвітлюванням збуджених атомів при переході їх в нормальний стан. Висока яскравість і помітна протяжність шару тліючого світіння – важлива практична властивість приладів тліючого розряду, тому що це дозволяє візуально спостерігати за станом приладу при значній віддаленості його від місця спостереження. При збільшенні відстані від катода енергія електронів падає, зменшується число збуджуючих зіткнень і негативне світіння переходить в фарадеевий темний простір. Підтримання провідності в позитивному стовпі забезпечується тим, що тут в порівнянні з негативним світінням зростає напруженість електричного поля.

Позитивний стовп – плазмова ділянка з приблизно однаковими концентраціями електронів і іонів. Через велику рухливість струм в стовпі переноситься в основному електронами. Так як поле в стовпі набагато менше, ніж в катодному просторі, іонізація тут в основному визначається безладним, а не спрямованим, рухом електронів.

Анодне падіння виникає при великих відстанях між катодом і анодом. Воно прискорює електрони і забезпечує додаткову іонізацію молекул газу. Анодне падіння зникає при зближенні електродів, коли анод потрапляє в область фарадеевого темного простору, де існує надлишок електронів і струм переноситься за рахунок дифузії з області тліючого світіння.

Кількісні закономірності процесів в катодній частини нормального тліючого розряду

Найбільше значення для розряду має катодна частина. Основні величини, що характеризують її – катодне падіння напруги U_{kn} , нормальна щільність струму на катоді j_{kn} та протяжність катодного частини розряду $p_0 d_{kn}$.

Розглянемо плоскопараллельний проміжок з постійним полем між електродами.

Рівняння для приросту електронного струму без урахування втрат має вигляд

$$dI_e = \alpha dI_e dU, \quad (1.1)$$

де α – Коефіцієнт об'ємної іонізації; dU – пройдена електронами різниця потенціалів. Після інтегрування одержуємо

$$I_{ea} = I_{ek} e^{\alpha U_{ak}}, \quad (1.2)$$

де I_{ea} , I_{ek} – струм електронів, що відповідно приходять на анод і покидають катод; U_{ak} – різниця потенціалів між катодом і анодом.

Кількість нових електронів, створених за 1 с в результаті іонізації, має дорівнювати різниці кількості електронів, що приходять на анод, і кількості електронів, що залишають за цей час катод:

$$I_{ea} - I_{ek} = I_{ek} (e^{\alpha U_{ak}} - 1). \quad (1.3)$$

На кожен новий електрон доводиться також один новий іон, а кожен позитивний іон, що потрапляє на катод, створює γ електронів. Тоді кількість нових електронів, утворених на катоді:

$$I_{ek} \gamma (e^{\alpha U_{ak}} - 1). \quad (1.4)$$

Щоб струм був сталим, ця величина повинна дорівнювати I_{ek} . Звідси слідує, що

$$\gamma (e^{\alpha U_{ak}} - 1) = 1. \quad (1.5)$$

Вираз (1.5) можна розглядати як умову самостійного розряду, напруга запалювання якого

$$U_z = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right). \quad (1.6)$$

Падіння напруги на проміжку

$$U_{kn} = \frac{1}{\alpha_{e\Phi}} \ln \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right), \quad (1.7)$$

де $\alpha_{e\Phi}$ – ефективне значення коефіцієнта в нормальному тліючому розряді з урахуванням неоднорідності поля.

Коефіцієнт α залежить від приведеної напруженості поля $\frac{\bar{E}}{p_0}$. Ця величина характеризує енергію, накопичену електроном на шляху середнього вільного

пробігу електронів у газі при 0°C $\left(\lambda_0 = \frac{1}{p_0}\right)$. Важливою особливістю нормального тліючого розряду є те, що в процесі його формування в катодній частині розряду автоматично встановлюється оптимальне середнє значення приведеної напруженості поля $\left(\frac{\bar{E}}{p_0}\right)$, їй відповідає мінімум питомої напруги іонізації $U_M \equiv \frac{1}{\alpha}$.

Друга основна величина, що відноситься до катодного частини нормального тліючого розряду, – щільність струму. При даних матеріалах катода, роді і тиску газу, що заповнює прилад, щільність струму на катоді залишається величиною постійною. Числовий зв'язок між щільністю струму j_{kn} , падінням напруги U_{kn} та протяжністю катодної частини розряду $p_0 d_{kn}$ можна записати у вигляді

$$\frac{j_{kn}}{p_0^2} = K \frac{\mu_i \left(\frac{\bar{E}}{p_0}\right)_{opt}^3}{U_{kn}} = j_{ko}, \quad (1.8)$$

де K - коефіцієнт пропорційності; μ_i – рухливість іонів.

Третя характерна величина в нормальному тліючому розряді – узагальнена протяжність катодного частини розряду $p_0 d_{kn}$. Її можна знайти з рівності

$$p_0 d_{kn} = \frac{U_{kn}}{\left(\bar{E}/p_0\right)_{opt}}. \quad (1.9)$$

З (1.9) видно, що для даного поєднання катода і газу $p_0 d_{kn}$ зберігає незмінне значення, $p_0 d_{kn} = const$.

При обраному тиску газу p_0 значення $p_0 d_{kn}$ дозволяє встановити мінімальну відстань між катодом і анодом, при якій в короткопроміжковому приладі забезпечується мінімальне значення катодного падіння напруги.

Аналіз формул (1.7) і (1.8) показує, що основні параметри нормального тліючого розряду U_{kn} та j_{kn} залежать від коефіцієнтів α та γ , які, в свою чергу, залежать від газових домішок і поверхневих забруднень.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з інструкцією до лабораторної роботи і схемою лабораторної установки.
2. Зняти залежність площі катода, покритої світінням, і падіння напруги від струму U_a , $S = f(I_a)$. Побудувати залежність щільності струму на катоді від струму на катоді $j_k = f(I_a)$.
3. Зняти залежність напруги підтримання розряду від струму $U_p = f(I_a)$ при d_1 та d_2 , де d – відстань анод-катод.
4. Зняти залежність напруги підтримання розряду від відстані між електродами при двох значеннях струму $U = f(d)$, $I_a = const$.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема лабораторної установки.
3. Таблиці вимірювань і обчислення величин.
4. Характеристики ламп тліючого розряду.
5. Короткі висновки

Контрольні запитання

1. Поясніть загальну характеристику тліючого розряду. Криві розподілу потенціалу, напруженості електричного поля, яскравості.
2. Розкажіть, які процеси протікають в катодних областях розряду. Параметри катодного області. Від чого вони залежать?
3. Поясніть процеси в позитивному стовпі.
4. Основні параметри плазми: квазінейтральність; характер руху заряджених частинок; поздовжня і поперечна напруженості електричного поля; температура

заряджених частинок; іонні оболонки у стінок і електродів.

5. Якими процесами характеризується анодна область?
6. Розподіл потенціалу по довжині. Як він змінюється при зближенні електродів?
7. Які причини викликають емісію електронів з катода при тліючому розряді?
8. Особливості нормального та аномального тліючих розрядів.

[1,2]

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛІТРОНІВ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

Мета роботи – ознайомитися з пристроєм, параметрами та характеристиками стабілізатора напруги.

Короткі теоретичні відомості

Стабілізуюча дія стабілітрона тліючого розряду базується на властивості нормального тліючого розряду зберігати постійним нормальне катодне падіння напруги $U_{к.н}$ та щільність струму $j_{к.н}$ доки не вся поверхня катода покрита світінням. Зі збільшенням розрядного струму I_a пропорційно йому збільшується поверхня катода покрита світінням, тобто

$$I_a = j_{к.н} S_k. \quad (2.1)$$

Конструктивно стабілітрон найчастіше представляє собою циліндричний катод, вздовж вісі якого розташований дротяний анод (рис.2.1).

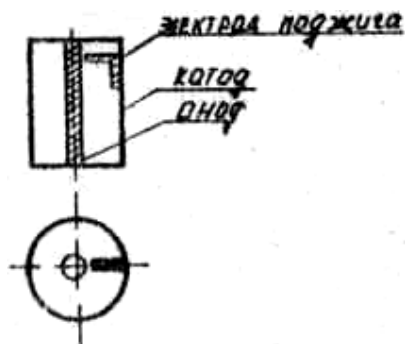


Рис. 2.1. Конструкція стабілітрона.

Ці електроди найчастіше роблять із чистого заліза, молібдену, нікелю. Внутрішня поверхня катода може бути активована для зниження напруги запалювання (U_z – напруга, при якій відбувається запалювання розряду в лампі) і напруги горіння (U_n – напруга, яка встановлюється після запалювання розряду). Для зменшення напруги запалювання, крім того, слугує електрод підпалу, приєднаний до катода. Все це запаюється в скляну колбу, яку наповнюють розрідженим (5...40 мм рт. ст.) інертним газом, найчастіше неоном з домішкою гелію або аргону.

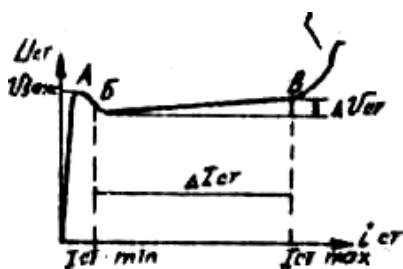


Рис.2.2. Вольт-амперна характеристика стабілітрона.

На рис.2.2 показана вольт-амперна характеристика стабілітрона. У точці А анодна напруга досягає напруги запалювання U_3 , і в стабілітроні виникає тліючий розряд. Для більшості стабілітронів значення U_3 знаходиться в межах 80...200 В.

Після запалювання розряду напруга на газорозрядному проміжку зменшується через зменшення його внутрішнього опору в провідному стані. У діапазоні робочих струмів від $I_{CT min}$ до $I_{CT max}$ зберігається нормальний тліючий розряд. $I_{CT min}$ — мінімальний струм, при якому стійко горить нормальний тліючий розряд. Він залежить від роду і тиску газу, матеріалу катода, і для більшості стабілітронів значення $I_{CT min}$ знаходиться в межах 1,5...10 мА.

Верхня межа струму $I_{CT max} = j_{к.н} \cdot S_{K max}$ визначається повною площею поверхні катода $S_{K max}$ і зазвичай складає від одиниць до десятків міліампер в залежності від способу використання стабілітрона.

Подальше збільшення струму через стабілітрон I_{CT} пов'язано із зростанням щільності струму $j_{к.н}$, напруги U_n і переходом до аномального тліючого розряду (ділянка ВГ).

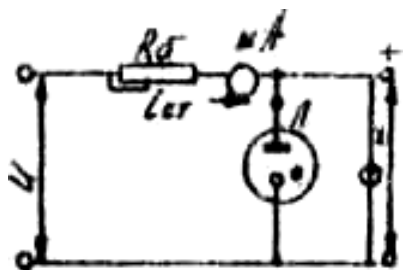


Рис.2.3. Схема зняття вольт-амперної характеристики стабілітрона.

Вольт-амперна характеристика стабілітрона має невеликий гістерез,

пов'язаний з тепловою інерцією лампи і з процесами в газовому розряді. Найпростіша схема вимірювання вольт-амперної характеристики стабілітрона показана на рис. 2.3. Тут R_{δ} – обмежувальний опір. Струм I_{CT} , що протікає через стабілітрон, вимірюється міліамперметром, напруга на стабілітроні U_{CT} – ламповим вольтметром. Нахил вольт-амперної характеристики стабілітрона визначається внутрішнім (диференційним) опором приладу, який є важливим параметром:

$$R_{iCT} = \frac{dU_{CT}}{dI_{CT}}. \quad (2.2)$$

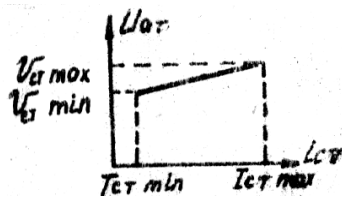


Рис.2.4. Апроксимована вольт-амперна характеристика (робоча ділянка) стабілітрона.

Складемо еквівалентну схему стабілітрона. Апроксимуючи дійсну робочу частину вольт-амперної характеристики стабілітрона похилою прямою, отримаємо наступне рівняння ідеалізованої характеристики (рис.2.4):

$$U_{CT} = U_{CT \min} + I_{CT} R_{iCT}, \quad (2.3)$$

де $U_{CT \min}$ та $U_{CT \max}$ – напруга на стабілітроні при токах відповідно $I_{CT \min}$ та $I_{CT \max}$.

З виразу (2.3) видно, що еквівалент стабілітрона – включена назустріч живлячому джерелу напруги батарея з напругою $U_{CT \min}$ та внутрішнім опором R_{iCT} (рис. 2.5).

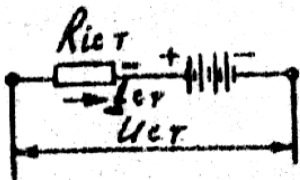


Рис.2.5. Еквівалентна схема стабілітрона.

Внутрішній опір стабілітрона, який іноді називають внутрішнім опором перемінному току і практично обчислюють як

$$R_{iCT} = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}}, \quad (2.4)$$

де ΔU_{CT} і ΔI_{CT} – прирости відповідно напруги та струму стабілітрона (див. рис. 2.2), значно відрізняється від опору постійному струму (статичного опору)

$$R_o = \frac{U_{CT}}{I_{CT}}. \quad (2.5)$$

При збільшенні струму через стабілітрон опір постійному струму зменшується, тоді як R_{iCT} не змінюється протягом робочого ділянки. Для більшості стабілітронів значення R_{iCT} коливається від 50 Ом до 300 Ом, значення R_o – має порядок декількох кОм. Важливий параметр схеми зі стабілітроном – її коефіцієнт стабілізації, який визначається як властивостями самого стабілітрона, так і даними схеми. Для зручності розрахунку схеми скористаємося еквівалентною схемою стабілізуючої комірки (рис. 2.6).

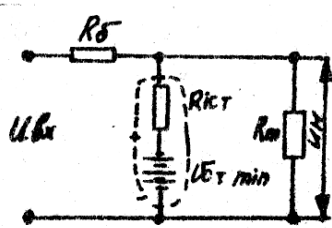


Рис.2.6. Еквівалентна схема стабілізуючої комірки.

Зважаючи на паралельне підключення опору навантаження R_H до стабілітрону всякі зміни напруги на ньому дорівнюють змінам напруги на навантаженні. Шунтуючою дією опору навантаження R_H можна знехтувати, бо завжди

$$R_H \gg R_{iCT}.$$

Тому при зміні вхідної напруги на ΔU_{BX} , зміна напруги на стабілітроні визначається співвідношенням плечей дільника опорів R_δ і R_{iCT} ,

$$\Delta U_{CT} = \frac{R_{iCT}}{R_\delta + R_{iCT}} \Delta U_{BX}. \quad (2.6)$$

Зважаючи на малість R_{iCT} в порівнянні з R_δ , можна вважати, що

$$\Delta U_{CT} = \Delta U_{BX} \frac{R_{iCT}}{R_\delta}. \quad (2.7)$$

Отже, зміна напруги на навантаженні стабілітрона в R_δ / R_{iCT} разів менше зміни вхідної напруги.

Коефіцієнт стабілізації для стабілізаторів напруги виражається як відношення відносної зміни дестабілізуючого чинника до відносної зміни напруги стабілізаторів. Коефіцієнт стабілізації по вхідній напрузі

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{BX}}{U_{BX}} \bigg/ \frac{\Delta U_{CT}}{U_{CT}} \quad (2.8)$$

або, скориставшись виразом (2.8), маємо

$$K_{CT} = \frac{R_\delta U_{CT}}{R_{iCT} U_{BX}}. \quad (2.9)$$

З формули (2.9) випливає, що при зменшенні R_{iCT} (це відповідає зменшенню нахилу вольт-амперної характеристики стабілітрона), коефіцієнт стабілізації збільшується. Збільшення R_δ також веде до збільшення K_{CT} . Але значне збільшення R_δ не вигідне з енергетичної точки зору, оскільки доводиться збільшувати вхідну напругу, більша частина якої буде губитися в баластному опорі.

Щоб з'ясувати, як K_{CT} залежить від опору навантаження і статичного опору стабілітрона, перетворимо (2.9). Для цього достатньо виразити відношення U_{CT} / U_{BX} через параметри схеми:

$$U_{BX} = U_{CT} + R_\delta (I_{CT} + I_H), \quad (2.10)$$

де I_{CT} та I_H – струм відповідно через стабілітрон і навантаження.

Розділимо ліву і праву частини виразу (2.10) на U_{CT} .

Маємо

$$\frac{U_{BX}}{U_{CT}} = 1 + \frac{I_{CT}}{U_{CT}} R_\delta + \frac{I_H}{U_{CT}} R_\delta. \quad (2.11)$$

Так як $U_{CT} / I_{CT} = R_O$, а $\frac{U_{CT}}{I_H} = R_H$, остаточно отримаємо

$$\frac{U_{BX}}{U_{CT}} = R_\delta \left(\frac{1}{R_\delta} + \frac{1}{R_O} + \frac{1}{R_H} \right). \quad (2.12)$$

Підставляючи вираз (2.12) в (2.9), маємо

$$K_{CT} = \frac{\frac{1}{R_{ICT}}}{\frac{1}{R_{\delta}} + \frac{1}{R_O} + \frac{1}{R_H}}. \quad (2.13)$$

Звідси можна зробити висновок, що K_{CT} можна збільшити шляхом збільшення статичного опору стабілітрона R_O . Для цього слід працювати при малих струмах через стабілітрон, тобто на початку робочої ділянки вольт-амперної характеристики. Межа цього способу збільшення K_{CT} визначається мінімальним струмом розряду $I_{CT\min}$.

Що стосується навантаження, то з його збільшенням K_{CT} збільшується, причому найбільше значення K_{CT} виходить при $R_H = \infty$, тобто в режимі холостого ходу.

Додатковий опір визначає межі змін вхідної напруги, в яких забезпечується стабілізація (діапазон стабілізації по вхідній напрузі – ΔU_{BX}). ΔU_{BX} визначається як добуток максимального зміни струму через стабілітрон (діапазон зміни струму) на додатковий опір R_{δ} . Внутрішнім опором стабілітрона нехтуємо ($R_{ICT} \ll R_{\delta}$):

$$\Delta U_{BX} = (I_{CT\max} - I_{CT\min}) R_{\delta}. \quad (2.14)$$

Незначний внутрішній опір стабілітрона забезпечує підтримання сталості напруги незалежно від коливань струму навантаження. У зв'язку з цим вводиться поняття коефіцієнта стабілізації за навантаженням:

$$K_H = \frac{\Delta I_H / I_H}{\Delta U_{CT} / U_{CT}}. \quad (2.15)$$

Тут ΔI_H – приріст струму навантаження; I_H – середній струм на ділянці, де береться приріст.

Розглядаючи еквівалентну схему стабілізуючої комірки (див. рис.2.6) бачимо, що внутрішній опір R_{ICT} навантаженого джерела живлення (з напругою $U_{CT\min}$) безпосередньо сприймає всі зміни струму навантаження:

$$\Delta U_{CT} \approx \Delta I_H R_{ICT}. \quad (2.16)$$

Звідси коефіцієнт стабілізації за навантаженням приймає дещо інший вигляд:

$$K_H = \frac{\Delta I_H / I_H}{\frac{\Delta I_H R_{iCT}}{U_{CT}}} = \frac{U_{CT}}{I_H R_{iCT}}. \quad (2.17)$$

Розглянемо діапазон зміни опору навантаження. Критерій мінімального навантаження – забезпечення запалювання стабілітрона. При споживанні навантаженням максимального допустимого струму стабілітрон не може запалитися без короткочасного відключення навантаження. Можна використовувати в якості баластного опір з додатнім температурним коефіцієнтом. При цьому в момент включення вхідної напруги на стабілітрон буде подано велику напругу, тому що в холодному стані додатковий опір має значно менше значення.

Відключення навантаження викликає негайне збільшення струму через стабілітрон на значення, що дорівнює струму навантаження. Тому сума струму навантаження і найбільшого струму через стабілітрон в робочому режимі не повинна перевищувати максимально допустимого струму для даного стабілітрона. При постійно підключеному навантаженні допустима сума струмів через навантаження і стабілітрон, дещо більша $I_{CT\max}$. Але підвищення струму навантаження веде до зменшення додаткового опору, що, як було показано в (2.9), зменшує коефіцієнт стабілізації по вхідній напрузі. Практично максимальне значення струму навантаження не повинно перевищувати $I_{CT\max} - I_{CT\min}$. Отже, діапазон зміни опору навантаження буде перебувати в межах

$$R_H = \frac{U_{CT\min}}{I_{CT\max} - I_{CT\min}} \dots R_H \rightarrow \infty.$$

Розрахунок схеми зі стабілітроном повинен починатися з розрахунку R_δ :

$$R_\delta = \frac{U_{BX} - U_n}{I_{CT} + I_H}.$$

Значення I_H завжди задається. Що стосується I_{CT} , то якщо його вибрати рівним $I_{CT\min}$, схема буде стабілізувати лише зростання вхідної напруги. При зменшенні вхідної напруги стабілітрон гасне.

Якщо ж $I_{CT} = I_{CT\max}$, стабілізація буде відбуватися тільки при зниженні вхідної напруги. При підвищенні напруги, струм через стабілітрон стає більше максимально

допустимого, що призводить до його поломки.

У загальному випадку, при зміні вхідної напруги в обидва боки за струм через стабілітрон приймають його середнє значення

$$I_{CTCP} = \frac{I_{CT\min} + I_{CT\max}}{2}.$$

Отже остаточно

$$R_{\delta} = \frac{U_{BX} - U_n}{I_H + I_{CTCP}}.$$

Стабілітрони, в залежності від призначення поділяють, на такі види:

1. Прилади для безпосередньої стабілізації (СГ1П, СГ2П, СГ3П, СГ4С та інші), що мають велику площу катода, на максимально допустимий струм порядку 40 мА, розраховані на напругу стабілізації 70 ... 150 В.

2. Стабілітрони для опорного напруги (СГ5Б, СГ202Б), що працюють при певному струмі, мають відповідно невелику площу катода, та, відповідно, і малі розміри, та застосовуються в електронних стабілізаторах. Максимально допустимий струм цих стабілітронів 5 ... 10 мА.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою лабораторного макета (рис.2.7).
2. Розрахувати баластний опір.
3. Визначити напругу запалення і згасання стабілітрона.
4. Зняти вольт-амперну характеристику $U_{CT} = f(I_{CT})$.
5. Зняти зовнішню характеристику $U_{CT} = f(U_{BX})$ при трьох опорах навантаження R_H .
6. За отриманими в п. 5. характеристикам визначити діапазон і коефіцієнт стабілізації по вхідній напрузі і навантаженні.

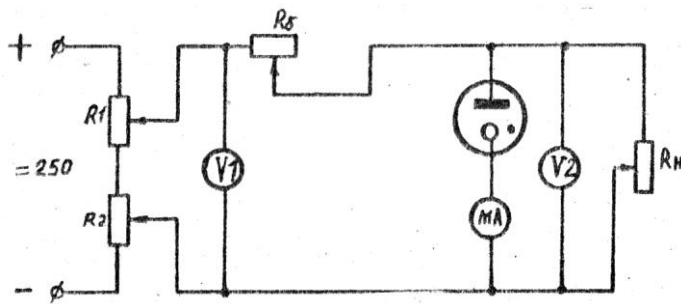


Рис.2.7. Схема макета.

Зміст звіту

1. Схема досліджень.
2. Таблиці експериментальних даних.
3. Графіки та розрахунки.
4. Висновки.

Контрольні запитання

1. Яку властивість нормального тліючого розряду покладено в основу стабілітрона?
2. Як конструктивно оформлюється стабілітрон?
3. Чим визначається верхня межа струму через стабілітрон?
4. Що таке диференційний опір стабілітрона і як він обчислюється?
5. Що є еквівалентом стабілітрону?
6. Яке кількісне співвідношення між статичним і диференційним опором?
7. Як залежить диференційний опір від частоти?
8. Як визначається коефіцієнт стабілізації за вхідною напругою та навантаженням?
9. Як впливає обмежувальний опір на коефіцієнт стабілізації за вхідною напругою?
10. Як впливає диференційний опір на коефіцієнт стабілізації як по вхідній напрузі, так і за навантаженням?
11. Критерій навантаження, що підключається.

[3;4, с. 259 – 269].

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТИРАТРОНУ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

Мета роботи – ознайомитися з пристроєм, параметрами, характеристиками тиратрона тліючого розряду.

Короткі теоретичні відомості

Використовуваний в іонних приладах з холодним катодом тліючий розряд – один з найбільш поширених видів розряду при низькому тиску (порядку міліметрів ртутного стовпа).

Основні процеси, що зумовлюють в тліючому розряді проходження електричного струму через газ – об'ємна іонізація, а також випускання катодом електронів під дією іонного бомбардування (поверхнева іонізація).

Тліючий розряд відноситься до типу самостійних розрядів, які не потребують для своєї підтримки штучної іонізації. Для підтримки такого розряду необхідно, щоб кожен електрон, що виходить з катода і потрапляє на анод, в результаті всіх процесів, які відбуваються в розрядному просторі, забезпечив вихід з катода не менше одного нового електрона. Математична умова існування самостійного розряду записується як

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1,$$

де γ – коефіцієнт поверхневої іонізації (число вторинних електронів, що вибиваються одним позитивним іоном при ударі о катод); α – коефіцієнт об'ємної іонізації (число іонізацій, що виробляються електроном на шляху в 1 см); d – відстань між електронами.

Нормальний тліючий розряд має ділянку, в межах якої при зміні сили струму падіння напруги на приладі майже не змінюється. Ця особливість широко використовується для стабілізації напруги в стабілітронах тліючого розряду. Зростання струму супроводжується збільшенням робочої (тієї, що світиться) поверхні катода. Після того, як поверхня катода покриється світінням і падіння напруги на приладі збільшиться, розряд стає аномальним тліючим.

Використовуваний в тиратронах з холодним катодом нормальний тліючий розряд з'являється, якщо прикладена до електродів трубки напруга у багато разів вище потенціалу іонізації газу, що наповнює прилад. Він є самостійним, оскільки позитивні іони, що утворилися при іонізації, не тільки нейтралізують електронний просторовий заряд біля катода, але, підходячи близько до катода, бомбардують його, тим самим викликаючи електронну емісію з холодного катода. Напруга, необхідна для виникнення самостійного тліючого розряду, називається напругою запалювання (U_{az}).

Анодна напруга запалювання залежить від роду газу та його тиску, матеріалу електродів і відстані між ними.

У найпростішому виконанні тиратрон тліючого розряду являє собою заповнений інертним газом трьохелектродний прилад, що містить, крім двох основних електродів (катода і анода), допоміжний електрод-сітку, який виконує функції органу керування. Через отвір в сітці в процесі розвитку розряду електрони проходять з катодної області в анодну (рис.3.1).

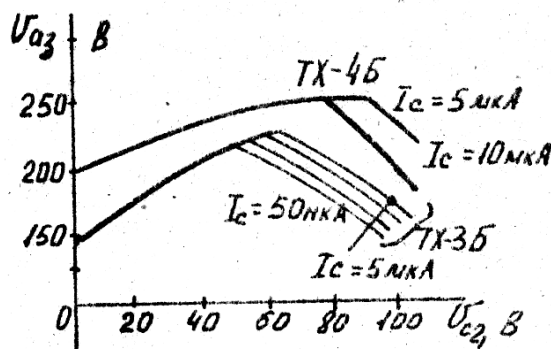


Рис.3.1. Статичні пускові характеристики тиратронів ТХ-3Б, ТХ-4Б.

Сітка, як орган керування, має в іонних приладах можливість тільки відкривати тиратрон в необхідний момент часу, даючи можливість розвинутися в ньому розряду, але припиняти розряд вона не може.

До подачі на сітку керуючого сигналу прилад замкнений по основному каналу анод-катод, хоча до приладу прикладена пряма напруга між анодом і катодом. Рівень цієї напруги вибирається таким, при якому самостійний розвиток розряду в основному проміжку (без участі поля сітки) статися не може. Лише після подачі

позитивного потенціалу на сітку, в її ланцюгу запалюється допоміжний розряд і в сітці ланцюга з'являється сітковий струм, у зв'язку з чим напруга запалювання основного розряду в ланцюгу катод-анод знижується. Зниження напруги запалювання пояснюється тим, що заряди, які дифундують з плазми сіткового розряду, що є каналом для сіткового струму, проникають через отвір сітки в преданодну область, де виникають необхідні умови для розвитку основного розряду. Різницю між напругами живлення і горіння розряду сприймає на себе навантажувальний опір анодного ланцюга тиратрона.

Анодний струм, що є вихідним струмом тиратрона, зазвичай набагато більше сіткового. Це перевищення характеризує підсилюючі властивості тиратрона по току. Чим вище коефіцієнт посилення, тим чутливіший тиратрон по входу. Після запалювання основного розряду в тиратроні та встановлення стаціонарного стану, струм в анодному ланцюзі тиратрона залишається незмінним. Розряд гасне або після зняття анодної напруги, або її зниження до значення, меншого ніж напруга горіння.

Після запалювання основного розряду, зміна сіткової напруги, навіть при переході до негативної в визначених межах, впливати на хід розряду в ланцюзі анод-катод не може. Це пояснюється тим, що з появою плазми основного розряду позитивно заряджена сітка притягує до себе з плазми електрони, а негативно заряджена – позитивні іони. Оточуючи позитивно заряджену сітку, електрони утворюють біля неї електронну оболонку. Поле притягнутих зарядів в оболонках компенсує собою поле, створюване зарядом від джерела сіткової напруги на поверхні сітки, у зв'язку з чим поле сітки за оболонку не проникає і тому впливати на розряд не може. Поки оболонка того чи іншого знака зберігається у сітки, сітка залишається бездіяльною, причому цей механізм має місце не тільки під час горіння розряду, але і протягом деякого часу після закінчення розряду (період деіонізації).

Заряди з оболонки безперервно уходять на сітку, але їх замінюють інші, що приходять з плазми розряду. Тому протягом усього часу існування оболонки в сітковому ланцюзі протікає струм.

Крім сітки керування, в деяких типах тиратронів вводиться ще один допоміжний електрод, який називається підготовчим. Необхідність у такому розряді

обумовлена тим, що його плазма використовується як джерело електронів. Отримувати такі електрони безпосередньо від катода за рахунок сіткового розряду недоцільно та пов'язано з втратою основної якості сіткового ланцюга – його високої чутливості. Тому функцію емісії первинних електронів покладають на підготовчий розряд, який, як джерело електронів, зазвичай називають плазмовим катодом.

Напруга, необхідна для запалювання і горіння підготовчого розряду, залежить від типу катода, матеріалу і стану його поверхні, відстані його до анода, а також від роду і тиску газу, що заповнює прилад.

Допоміжний електрод, при наявності струму в його ланцюзі, помітно знижує напругу запалювання розряду в анодному ланцюзі тиратрона, причому тим більше, чим більше струм. Однак напруга запалювання може знизитися лише до значення напруги горіння.

Такий режим керування, коли момент відкриття тиратрона визначається струмом розряду в сітковому ланцюзі, називається струмовим керуванням.

При струмовому керуванні не обов'язково мати в тиратроні окремий анод для підготовчого розряду. Його функцію може прийняти на себе сітка управління.

Основний розряд виникає в тому випадку, якщо на сітку через розділовий конденсатор подається імпульсна напруга такого значення, щоб збільшення розрядного струму сіткового ланцюга перевищило струм спрацьовування при даному U_a (рис. 3.2).

Інший варіант системи керування, що принципово відрізняється від описаного, використовується при електростатичному керуванні і застосовується в двох- та багатосіткових тиратронах.

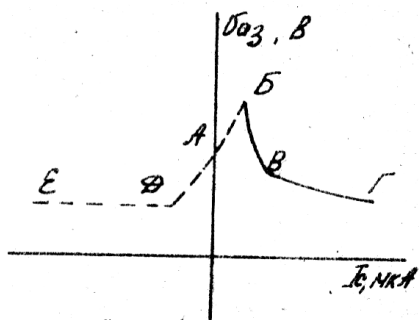


Рис.3.2. Статична пускова характеристика тиратрона МТХ-90.

Найближча до катода сітка виконує тут тільки функції анода підготовчого розряду, а наступна за нею – функції керуючого електрода. Завдяки підвищенню струму в підготовчому розряді, значно зростає потік зарядів, що проходить через отвори в обох сітках. Цей потік перевищує той мінімум, що необхідний для початку розвитку розряду в анодній області тиратрона при даному значенні напруги на аноді.

При наданні другій сітці негативної, по відношенню до першої, напруги зсуву, затримується потік електронів до їх входження в сітковий отвір другої сітки і, таким чином, розвиток основного розряду в тиратроні. Тиратрон відкривається при збільшенні потенціалу на другий сітці.

Спосіб запалювання тиратрона, коли негативне поле в проміжку між сітками змінюється за значенням або замінюється позитивним, отримав назву електростатичного методу керування.

Його перевага полягає в можливості геометричного підсумовування полів, коли виникає необхідність керувати моментом включення тиратрона сітками, що живляться від різних джерел сигналу, тобто створювати характеристику запалювання будь-якого необхідного виду (типу "і", "або", "ні" та інші).

Основні характеристики:

1) анодно-сіткові запалювання (пускові) – показують залежність анодної напруги запалювання розряду в приладі $U_{\alpha z}$ від сіткового струму I_c в приладах зі струмовим керуванням, або від сіткової напруги U_c в приладах з електростатичним керуванням (рис. 3.1, 3.2);

2) часові розвитку розряду – показують залежність тривалості етапів розвитку розряду в основному проміжку від значень сіткового струму або напруги;

3) вольт-амперна, що відображає зв'язок між струмом і напругою горіння основного розряду (рис. 3.3): $U_{\alpha} = f(I_{\alpha})$;

4) відновлення замкненого стану приладу після гасіння розряду в ньому (рис. 3.4).

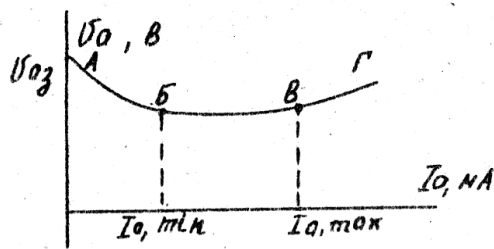


Рис. 3.3. Вольт-амперна характеристика проміжку анод-катод.

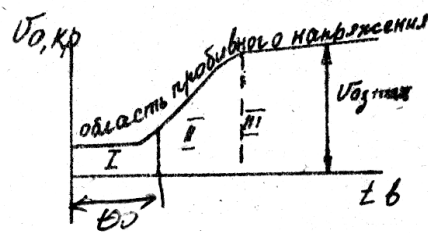


Рис.3.4. Характеристика відновлення електричної міцності.

Тиратрони тліючого розряду також застосовують у якості:

1. електрометричних приладів для вимірювання малих постійних струмів;
2. вимірювачів амплітуд імпульсних сигналів (амплітудні дискримінатори);
3. високочутливих світлових індикаторів.

Високочутливі індикаторні тиратрони застосовують у пристроях з напівпровідниковими приладами (транзисторами) в якості вихідних елементів пристроїв для проведення візуального контролю за станом приладів і ланцюгів, а також активних елементів для створення синтезуючих індикаторів.

Основна перевага таких тиратронів – малий рівень керуючого напруги.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою лабораторного макета (рис. 3.5).

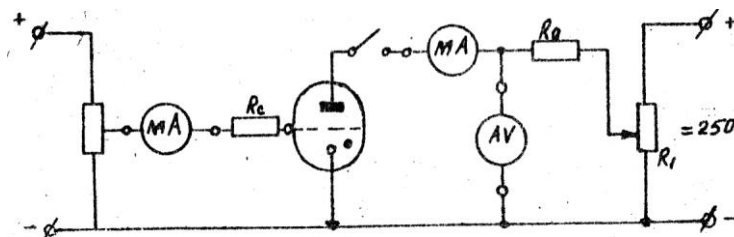


Рис. 3.5. Схема макета.

Електричні дані тиратрона МТХ-90:

анодна напруга – 60 В;	напруга на сітці – 75 В;
струм в ланцюзі анода – 5 мА;	струм в ланцюзі сітки – 60 мкА;

2. Розрахувати баластні опори в сітковому і анодному ланцюгах.

3. Зняти пускову характеристику $U_{\alpha 3} = f(I_C)$, $U_{\alpha 3} = f(U_{C2})$.
4. Зняти вольт-амперну характеристику $U_{\alpha} = f(I_{\alpha})$.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схема лабораторного макета.
3. Таблиці розрахованих і обчислених величин.
4. Характеристики тиратрона.
5. Короткі висновки.

Контрольні питання

1. Які види розряду використовуються в тиратронах з холодним катодом?
 2. Основні умови виникнення та існування самостійного тліючого розряду?
 3. Як виглядає вольт-амперна характеристика тліючого розряду?
 4. Фізичні процеси, що відбуваються при електричному розряді в газі.
 5. Який вид емісії використовується в тиратронах з холодним катодом?
 6. Особливості нормального тліючого розряду.
 7. Від яких факторів залежить катодне падіння потенціалу?
 8. Що таке напруга запалювання? Від чого вона залежить?
 9. Поясніть характеристики запалювання та відновлення.
 10. Типи тиратронів тліючого розряду.
 11. Для чого створюється підготовчий розряд?
 12. Яке призначення мають сітки тиратронів?
 13. Яке керування запалюванням в тиратроні МТХ-90? Поясніть хід пускової характеристики цього тиратрона.
 14. Як виглядають вольт-амперні характеристики тиратронів? Поясніть хід пускової характеристики тиратрона ТХ-3Б.
 15. Яке керування запалюванням в двохсітковому тиратроні?
 16. Де знайшли застосування тиратрони з холодним катодом?
- [1; 5].

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВОГО ІНДИКАТОРНОГО ПРИЛАДУ

Мета роботи – ознайомитися з будовою, параметрами, характеристиками і схемами управління цифрових індикаторів.

Короткі теоретичні відомості

Існують різноманітні типи індикаторних ламп, в яких явище газового розряду дозволяє здійснити індикацію електричного сигналу. Газорозрядні індикатори широко застосовують в радіоелектроніці для візуального представлення вихідних даних пристроїв дискретної дії, в якості показчиків напруги, для фотореєстрації та інших цілей.

За характером індикації клас індикаторів тліючого розряду можна розділити на наступні групи:

1. Прилади, в яких до форми світіння не пред'являються спеціальні вимоги ("так". – "ні").
2. Прилади, в яких світіння має задану геометричну форму.
3. Прилади, в яких світловий сигнал представляється у знаковій формі (у вигляді цифрових, літерних або інших символів).

Індикаторні прилади зазвичай наповнюють чистим неоном або неоном з домішкою (0,5...1%) аргону при тиску порядку декількох десятків тор, що забезпечує отримання необхідних електричних і індикаційних характеристик. Додаток до неону домішки аргону, що вводиться для зниження напруги запалювання, призводить до зменшення інтенсивності світіння (в 1,5...2 рази).

Знакові індикатори виготовляють у вигляді багатокатодних приладів з одним або двома анодами. Катоди виготовляють у вигляді смужок, зігнутих по формі того чи іншого знака.

При горінні розряду між анодом і одним з таких катодів частина розряду випромінює світіння, що за формою повторює конфігурацію того знака, який має катод. Зі зміною контрольованої цифри або букви, розряд за допомогою системи

управління автоматично переноситься на інші катоди, світіння яких відображає змінене значення контрольованої величини.

Найбільшого поширення в групі знакових індикаторів отримали цифрові. Рідше застосовують літерні індикатори, а також індикатори з іншими символами.

Для використання у десятичній системі числення цифровий індикатор містить всі цифри від 0 до 9. За допомогою комплексу, складеного з поруч розташованих цифрових індикаторів, створюється можливість проводити дистанційний числовий контроль за ходом зміни контрольованих величин. Конструктивно ці прилади виконують наступним чином. У скляному балоні приладу, заповненому після видалення з нього молекулярних газів сумішшю інертних газів (99% Ne, 0,5% Ar, 0,5% He), при тиску, приблизно рівному 6000 Па/45 мм рт. ст., розташовані на різних рівнях 10 плоских катодів, що мають форму 10 арабських цифр (від 0 до 9). Анод приладу містить дві дротяні сітки, розташовані на різних рівнях і електрично з'єднані. Один з анодів розташований, як і у всіх приладах, над катодами, а інший – між ними.

Критерієм вибору порядку розташування електродів в індикаторі служить прагнення досягти мінімального екранування кожного з контурів всіх інших, для того щоб забезпечити максимально повне світіння катода, що приймає розряд в даний інтервал часу.

В даний інтервал часу розряд горить між анодом і тим катодом, якому схемою живлення приладу надається найбільш негативний потенціал.

Спостереження за зміною цифр, що світяться, проводиться в одних типах індикаторів з боку торцевої частини колби, а в інших – з боку бічної стінки колби.

При торцевій індикації електроди розташовуються горизонтально, а при бічній – вертикально. Перевага торцевої індикації полягає в тому, що при тих же зовнішніх габаритних розмірах приладу можна отримати знаки відносно великих розмірів.

Поряд з індикаторами нормальних габаритних розмірів, до яких відносять цифрові індикатори типів ИН-1, ИН-4, ИН-8 і ИН-14, випускають також малогабаритні прилади ИН-2 і літерні типу ИН-5. Нормальний режим роботи індикатора (повне охоплення світінням катодів і висока довговічність) більшою

мірою залежить від правильного вибору величин, які характеризують його електричний режим по струму.

При загальному прагненні мати струм мінімальним, щоб обмежити споживання індикатором електричної потужності, необхідно в той же час утримати значення струму в межах, що лежать не нижче допустимого мінімуму $I_{k \min}$. Мінімум напруги живлення індикатора $E_{a \min}$ визначається необхідним перевищенням напруги запалювання розряду. Ступінь перевищення визначається коефіцієнтом запису

$$K = \frac{E_a}{U_a}, \quad (4.1)$$

від значення якого залежить час запізнювання запалювання t_{zan} . Для того щоб зрівняти напруги запалювання розряду на всі катоди незважаючи на різну їх віддаленість від анодів між собою, а також для запобігання переходу розряду на траверзи катодів, катоди в знакових індикаторах оточені бічною металевою сіткою-екраном. Сітка потенціально пов'язана з анодами.

Обмеження катодного струму по мінімуму диктується необхідністю покриття світінням всієї видимої поверхні катода. Ця вимога в умовах можливого зниження в допустимих межах живлення індикатора пов'язана з необхідністю вибирати режим роботи знакового індикатора, близько до аномального тліючого розряду, так як збереження нормального заряду при постійній щільності струму може призвести до неповного покриття поверхні катода струмом, а, отже, і світінням.

Вихід в область аномального тліючого розряду не повинен бути глибоким, з тим щоб обмежити, по можливості, інтенсивність розпилення катода. Абсолютні значення інтенсивності розпилення залежать насамперед від матеріалу катода, а також від роду і тиску газу, що заповнює прилад. Катоди в знакових індикаторах виготовляють переважно з ніхромом.

У нових типах знакових індикаторів передбачається в якості катодного матеріалу використовувати титан. При цьому досягається менше розпилення катода. У нових типах індикаторів зменшення розпилення катода і підвищення його довговічності досягаються введенням в них ртутних парів. Аноди індикаторів виготовляють з дрітної нікелевої сітки.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою лабораторної роботи (рис. 4.1 – 4.3).
2. Визначити напругу виникнення і підтримки розряду для всіх катодів.
3. Зняти вольт-амперну характеристику для декількох катодів.

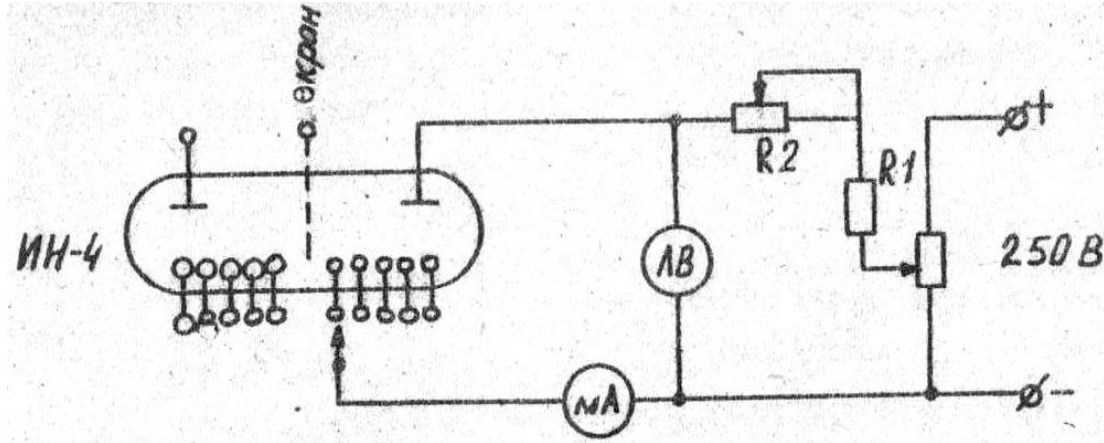


Рис. 4.1. Схема дослідження цифрового індикатора тліючого розряду (одно анодне включення): R_1 та R_2 – обмежувальні опори.

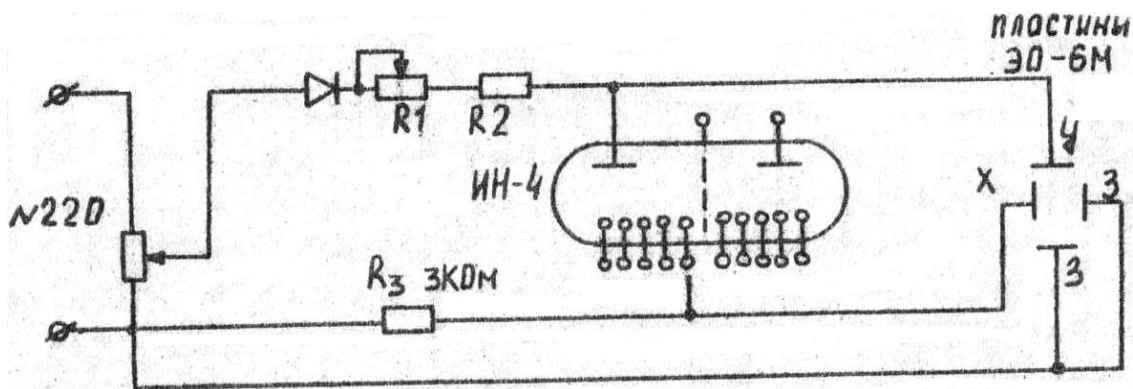
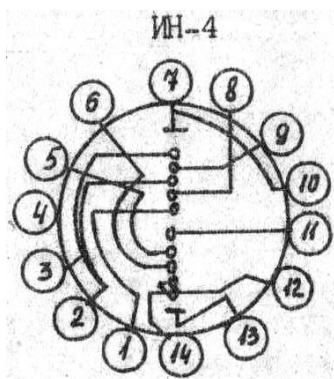


Рис. 4.2. Схема для спостереження на осцилографі вольт-амперної характеристики.



- | | |
|---------------|------------------|
| 1 – катод «4» | 8 – катод «0» |
| 2 – катод «6» | 9 – катод «2» |
| 3 – катод «8» | 10 – анод другий |
| 4 – екран | 11 – катод «3» |
| 5 – катод «9» | 12 – катод «5» |
| 6 – катод «7» | 13 – анод перший |
| 7 – вільний | 14 – катод «1» |

Рис. 4. 3. Схема з'єднання електродів зі штирками.

4. Зібрати схему для зняття на осцилографі вольт-амперної характеристики.
Замалювати її.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Схеми лабораторних випробувань.
3. Таблиці експериментальних даних.
4. Вольт-амперні характеристики.
5. Осцилограма.
6. Паспортні дані приладу.

Контрольні запитання

1. Який розряд використовується в індикаторних приладах?
2. Основні параметри аномального розряду.
3. Будова індикаторних приладів.
4. У чому причина різних значень напруг виникнення та напруг підтримання розряду для різних катодів? Від чого залежать ці величини?
5. Поясніть причину гистерезиса вольт-амперної характеристики.

[1; 5]

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЛАДІВ ДУГОВОГО НЕСАМОСТІЙНОГО РОЗРЯДУ

Мета роботи – ознайомитися з будовою, параметрами, характеристиками тиратрона з накалиним катодом.

Короткі теоретичні відомості

До класу приладів дугового несамостійного розряду відносять прилади з накалиним катодом. При нагріванні до досить високої температури він емітує електрони. Під дією електричного поля, що виникає при наданні аноду позитивного потенціалу по відношенню до катода, електрони прискорюються і, накопичуючи енергію, збуджують та іонізують атоми газу, з яким вони стикаються. При цьому виникають іони і вторинні електрони. Основні носії струму – електрони роль яких зводиться до компенсації об'ємного заряду. При такій компенсації через прилад може проходити значний струм (десятки і сотні ампер) при відносно малому падінні напруги $U_a = (10...20)$ В на приладі.

Особливість дугового розряду в приладах з накалиним катодом – його несамостійність, так як з припиненням нагріву катода дуга гасне.

Відсутність емісії з анода визначає вентильні властивості приладу, тобто його здатність пропускати струм тільки в одному напрямку від анода до катода. Під час непровідної частини періоду вся зворотня напруга U_e прикладена до вентилля.

Розглянемо фізичні процеси, що відбуваються при цьому в приладах.

5.1. Структура дугового розряду при низькому тиску

У провідну частину періоду між катодом і анодом горить дуга несамостійного розряду. Структура дуги залежить від тиску пари або газу і протяжності розрядного проміжку. При тиску порядку десятих частин мм рт. ст. і досить великої протяжності розрядного проміжку, структура дугового розряду і розподіл потенціалу мають такий вигляд (рис. 5.1).

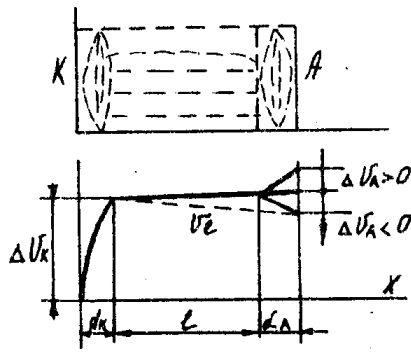


Рис. 5.1. Структура дугового розряду: падіння напруги в катодній області – ΔU_k ; падіння напруги в стовпі дуги – U_l ; анодне падіння потенціалу ΔU_a .

Дуга може бути розбита на три основні частини: 1) катод з протяжністю d_k і катодним падінням потенціалу ΔU_k ; 2) стовп дуги довжиною l і поздовжньою напруженістю поля E_l ; 3) анодна частина – протяжністю d_A і трьома можливими варіантами анодного падіння потенціалу ΔU_A . На ділянці у катода електрони отримують перше прискорення і нагромаджують достатню енергію, щоб іонізувати найближчий до катода стовп газу, звідки іони розходяться в протилежних напрямках – до катода і в стовп розряду. Стовп розряду – канал передачі електронів від катода до анода, який у зв'язку з компенсацією в ньому об'ємного заряду електронів об'ємним зарядом іонів має відносно велику провідність.

Анодна частина розряду виконує роль перехідної області, що готує прийом електронів анодом для передачі їх в зовнішній ланцюг.

5.2. Явища в катодному шарі при наявності негативного просторового заряду

Дослідження цієї частини дуги показали, що:

1) катодне падіння потенціалу приблизно дорівнює ефективному потенціалу іонізації газу;

2) протяжність ділянки іонізації приблизно дорівнює середньому вільному пробігу і більше довжини катодної частини розряду; довжина катодної частини розряду d_k визначається за різкої зміни нахилу кривої розподілу потенціалу. Товщина цього шару помітно менше довжини вільного пробігу електрона в газі.

В катодній частині електрони набувають енергію, достатню для іонізації і збудження. Іонізація і катодне падіння потенціалу пов'язані між собою.

1. Якщо катодне падіння потенціалу починає зростати понад потенціал іонізації, надлишок іонів, що виникає йде разом з швидкими електронами в позитивний стовп, обмежуючи тим самим подальше зростання ΔU_k .

2. При зменшенні ΔU_k нижче норми, послаблюється частка іонного струму, що йде в позитивний стовп, тому більша частка іонів залишається в катодній частині розряду і збільшує густину позитивних зарядів.

При сталому розряді основна частина іонів, що генерується в катодній частині розряду, йде до катода, а назустріч їм ідуть електрони, які відновлюють потрібну рівновагу концентрацій зарядів в катодній частині при іонізації ними газу. Зустрічний рух електронів та іонів в катодній частині розряду призводить до того, що струм тут складається з двох складових – електронної та іонної. Результуюча густина струму

$$j_k = j_{k.e} + j_{k.i}.$$

При нульовій напруженості поля на початку і наприкінці катодного частини розряду (тобто нульових початкових швидкостях електронів та іонів) відношення густин електронного та іонного струмів, що проходять цю частину розряду (який можна розглядати як вакуумний проміжок):

$$\frac{j_{k.i.}}{j_{k.e.}} = \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}.$$

Оскільки маса іона набагато більше маси електрона, частка іонного струму відносно невелика.

При власній термоелектронній емісії напруженість поля у катода має від'ємне значення або дорівнює нулю. Позитивна напруженість поля біля поверхні катода з'являється тільки тоді, коли власна термоелектронна емісія стає недостатньою, щоб забезпечити проходження через прилад струму, що потребує зовнішній ланцюг.

Хід кривої потенціалів в катодній частини розряду, що відповідає трьом можливим співвідношенням між струмом власної термоелектронної емісії катода I_s і фактичним електронним струмом катода $I_{k.e}$, показаний на рис.5.2.

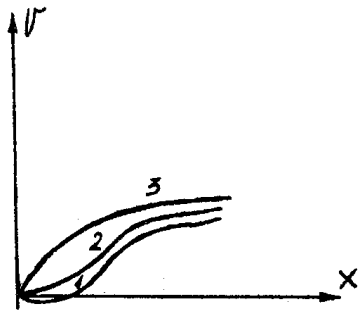


Рис. 5.2. Криві розподілу потенціалу в катодній частині розряду

1. Крива відповідає випадку, коли $I_{k.e} < I_s$. Біля катода при цьому виникає електронна хмара, яка повертає катоду надлишок електронів порівняно з кількістю тих, що уходять в стовп розряду.

Завдяки електронній хмарі у катода з'являється ділянка негативного падіння потенціалу.

2. Крива відповідає випадку, коли електронний струм катода дорівнює струму емісії $I_{k.e} = I_s$. Біля катода встановлюється нульова напруженість поля.

3. Струм $I_{k.e}$ перевищує струм емісії I_s . При цьому повне падіння потенціалу біля катода підвищується і біля поверхні катода з'являється позитивна напруженість поля, яка полегшує вихід з нього електронів. У зв'язку зі зменшенням роботи виходу щільність емісійного струму підвищується до значної, що забезпечує необхідне значення I_a . Це автоматичне зростання фактичної щільності струму, в порівнянні зі струмом власної термоелектронної емісії, при зростанні падіння потенціалу тільки в катодній частини розряду, і складає відмінну особливість можливого режиму роботи розжарених катодів іонних приладів в порівнянні з їх дією в електронних лампах. Такий режим небажаний, так як з ростом катодного падіння потенціалу зростає енергія іонів, які приходять до поверхні катода. При цьому посилюється розпилення катода від іонного бомбардування, а чутливість до розпилення розжарених катодів вище, ніж у холодних. Це знижує термін служби катода. Тому необхідно, щоб

$I_{k,e} \ll I_{\phi}$. Катодне падіння потенціалу не перевищує при цьому потенціалу іонізації газу U_i .

Щоб попередити розпилення катода через підвищене катодне падіння потенціалу при експлуатації допускають недорозжарення 5% по напрузі, тому що недорозжарення призводить до зниження струму власної емісії катода.

Щільність газу позначається на значенні ΔU_k . Зі зменшенням щільності зростає середній вільний пробіг електронів (при відносно слабкій компенсації їх об'ємного заряду іонами), що призводить до зростання ΔU_k .

5.3. Стовп і анодна частина розряду

При достатній протяжності міжелектродного проміжку формується стовп, що переходить у районі анода в анодну частину. Стовп характеризується постійною поздовжньої напруженістю E_e . Її значення визначається необхідною інтенсивністю іонізації газу, при якій кількість іонів, що знову утворюються в 1 см^3 стовпа в 1 секунду стає рівною кількості іонів, що йдуть з цього об'єму до стінок та електродів приладу. З появою в приладі стовпа характер процесів в розряді змінюється. З'являється анодна частина розряду.

Розглянемо ті процеси, які обумовлюють величину і знак анодного падіння потенціалу при наявності стовпа дуги. Кількість прийнятих анодом електронів повинна відповідати току, який проходить через прилад і зовнішню ланцюг, у який він включений. Умова прийому електронів анодом визначає три можливих варіанти падіння потенціалу біля анода (позитивне, негативне і нульове).

Значення і знак анодного падіння потенціалу залежать від двох факторів:

- 1) відносних розмірів приймальної поверхні анода, що визначає щільність струму на аноді;
- 2) ступеня компенсації об'ємного заряду електронів біля анода супроводжуваними їх іонами.

Плазма розряду обмежена певним діаметром оточуючої її скляної чи металеві оболонки. Вона пропускає через себе спрямований струм I_a , густина якого нерівномірно розподілена по перерізу розряду.

Нульове падіння потенціалу біля анода встановлюється, коли прийом анодом електронного струму I_a забезпечується при природному припливі до нього електронів. Для цього достатньо мати приймальню поверхню анода, що стикається з плазмою, рівною або навіть дещо меншою, ніж переріз плазми, так як число електронів, що потрапляє на анод, визначається приблизно їх безладним рухом.

Якщо діаметр анода менше діаметра плазми, навіть при опуклій поверхні, і приймальна поверхня його виявляється недостатньою, щоб забезпечити потрібний для зовнішньої ланцюга струм, то анод стає позитивним по відношенню до плазми (за рахунок перерозподілу потенціалів в анодному ланцюзі). У анода з'являється електронна оболонка. Тепер прийнятною поверхнею для електронів, що прямують до аноду при наявності оболонки, слугує її гранична поверхня з плазмою, яка більше фактичної поверхні анода.

Густина електронного струму безпосередньо біля анода підвищується за рахунок збільшення швидкості електронів, що проходять ділянку анодного падіння потенціалу. Цей режим відповідає позитивному анодному падінню $\Delta U_A > 0$ (рис.5.3).

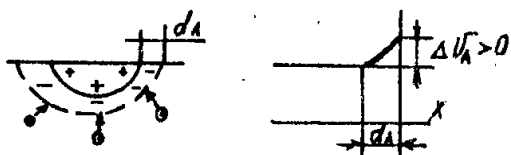


Рис. 5.3. Позитивне анодне падіння потенціалу

Якщо приймальна поверхня анода більше, ніж це потрібно при природному притоку електронів до аноду, надлишок електронів, що приходять до анода заряджає його по відношенню до плазми негативно (анод – плазма – обкладка конденсатора). В цьому випадку біля анода з'являється іонна оболонка. Поле її загальмовує ту частину електронів, яка виходить з плазми з енергією, недостатньою для подолання гальмівної дії поля оболонки. При сталому режимі анод приймає стільки електронів, скільки потребує зовнішній ланцюг. Анодне падіння потенціалу

в цьому випадку негативне (рис. 5.4). При розмірах приймальної поверхні анода, що забезпечує природний приплив тільки такої кількості електронів, яка споживається зовнішнім ланцюгом, $\Delta U_a = 0$. Розглянемо другий фактор – компенсацію об'ємного заряду електронів, що йдуть до анода супроводжуваними їх іонами.

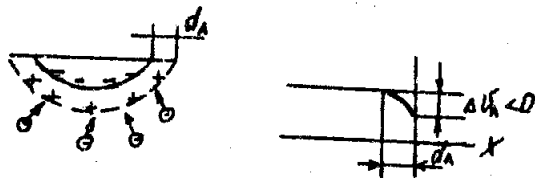


Рис. 5.4. Негативне анодне падіння потенціалу.

Іонізація газу поблизу анода ускладнена наступними факторами:

1. Електрони, що проходять останній вільний відрізок шляху до аноду, менший, ніж середній вільний пробіг іонізації, в іонізації газу участі не беруть.

2. Біля анода поворотні потоки електронів, які присутні в будь-якому елементі вільної плазми, є малими. Тому іони дифундують в анодний шар з сусідніх з ним шарів плазми. Така дифузія можлива, коли інтенсивність утворення іонів в прилеглих шарах плазми досить висока і умови для дифузії сприятливі. Якщо генерація іонів поблизу анода і дифузія їх до анода не сприятливі, навіть при відносно великій поверхні у анода встановлюється позитивний підйом потенціалу.

3. На приплив іонів до аноду впливає форма анода. Кращими з точки зору збільшення припливу іонів є порожній анод, або увігнутий. Перевага його ще в тому, що легше досягається мінімальна відстань між катодом і анодом, чим автоматично забезпечується мінімальне анодне падіння потенціалу.

Вольт-амперною характеристикою називається крива, що визначає залежність напруги на приладі ΔU_a від струму, що проходить через нього I_a . Знімається при живленні змінною або постійною напругою. Вони мало відрізняються одна від одної (рис. 5.5).

Повне падіння напруги

$$\Delta U_a = U_{нод} = \Delta U_k + \sum E_e \pm \Delta U_a,$$

де ΔU_k , ΔU_a – відповідно катодне і анодне падіння; $\sum E_e$ – Падіння напруги в стовпі, з урахуванням падінь напруг в місцях звуження дуги.

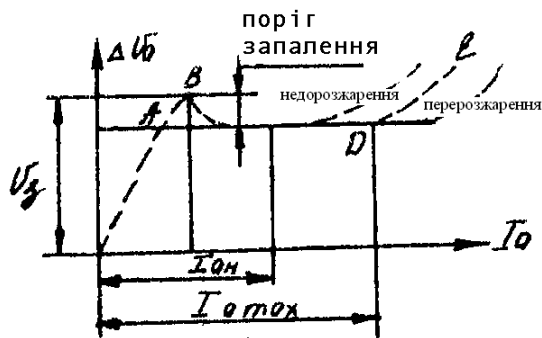


Рис. 5.5. Вольт-амперна характеристика дуги.

Хід вольт-амперної характеристики залежить від наступних факторів:

1. типу і якості катода;
2. температури його нагрівання;
3. конструктивного виконання теплових екранів;
4. тиску газу в приладі.

Можна виділити горизонтальну робочу ділянку АД і ділянку підйому ДЕ (ділянку насичення). Існує початкова ділянка (малі струми) – струми електронного розряду.

Перехід від електричного розряду в дуговий називається запалюванням дуги. Величина $U_{a.з.}$ відповідає запалюванню – потенціал запалювання.

Якщо тиск газу не нижче деякого необхідного мінімуму і катод зберігає нормальну емісію, $U_{a.з.}$ не перевищує помітно $\Delta U_a = U_{нод}$ – напругу горіння. Початкова частина характеристики в цьому випадку також горизонтальна.

При недостатній щільності газу або недостатньої емісії $U_{a.з.}$ підвищується.

Підвищення $U_{a.з.}$ над горінням $U_{нод}$ називається порогом запалювання. При цьому з'являється початкова ділянка. Протяжність робочої ділянки характеристики справа обмежена власною термоелектронною емісією катода.

При недостатній емісії відбувається перехід на ділянку насичення ДЕ. Робота на ДЕ неприпустима, оскільки призводить до розпорошення катода. При недорозжаренні робоча ділянка скорочується, що призводить до різкого підвищення

падіння ΔU_a , навіть в тому випадку, якщо струм в приладі помітно не перевищує його номінального значення.

Вольт-амперні характеристики в імпульсному режимі роботи приладу для воднево наповнення показані на рис. 5.6.

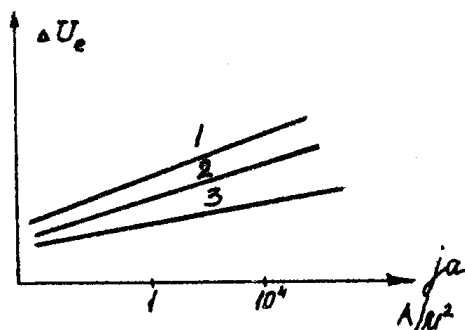


Рис. 5.6. Вольт-амперні характеристики розряду при різних температурах катода в імпульсному режимі: 1 – $T_k = 800^\circ \text{C}$; 2 – $T_k = 850^\circ \text{C}$; 3 – $T_k = 900^\circ \text{C}$.

На збільшення падіння напруги з ростом струму позначається також і омічне падіння напруги в приповерхневому шарі оксиду.

5.4. Сіткове управління в приладах з розжарений катодом

Функціями управління моментом відкриття приладу (запалюванням) мають прилади, забезпечені сіткою – тиратрони. Тиратрони наповнюють парами ртуті, інертними газами і H_2 . Тиратрони великої потужності та високого робочого струму зазвичай наповнюють парами Hg , меншої потужності – інертними газами. У тому і другому випадку тиратрони розраховуються на частоти не вище декількох сот тисяч герц. Для потужних імпульсних тиратронів застосовують водневе наповнення. Їх частотні характеристики – до декількох десятків кілогерц.

В тиратрона три електроди: катод, анод і сітка. Функції сітки – у встановленні необхідного моменту запалювання основного розряду, який робить тиратрон провідним.

Сітка виконана у вигляді металевого або графітового електрода з комірками або отворами, розташованими з певною щільністю. При такій будові сітка екранує собою в більшій чи меншій мірі поле анода. В результаті цього поле в просторі

сітка-катод послаблюється настільки, що запалювання розряду може стати неможливим. Таким чином, сітку можна використовувати для управління моментом запалювання.

Ступінь екранування сіткою поля анода визначається її проникністю.

Для запалювання дугового розряду необхідно, щоб енергія електронів була достатньою для розвитку ударної іонізації. Основне прискорююче поле при наявності сітки зосереджується в просторі сітка-анод. У цій області і слід очікувати розвитку ударної іонізації. Інтенсивність її залежить від U_a і кількості електронів, що проникають через сітку в область сітка-анод, тобто від проникності сітки. Якщо проникність мала, для запалювання необхідні великі значення U_a або $U_c > 0$. Якщо проникність велика, запалювання можливо при малих значеннях U_a і навіть при $U_c < 0$.

Перший випадок відповідає електростатичному управлінню, другий – струмовому.

Розглянемо принципи роботи сітки (рис. 5.7).

Дуга запалюється, коли анод позитивний по відношенню до катода. На сітку подається зсув, який можна змінювати за величиною і знаком. У чому ж роль сітки?

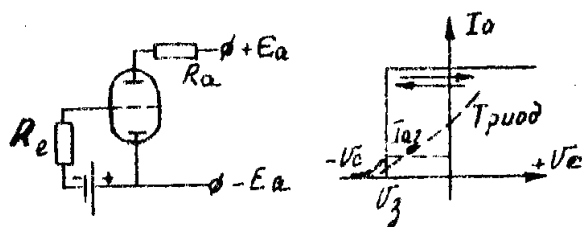


Рис. 5.7. Схема включення та анодно-сіткова характеристика тиратрону.

Розглянемо анодно-сіткову характеристику приладу при живленні постійним напругенням. Змінюємо струм на сітці від негативних до позитивних значень. Тут же нанесемо анодно-сіткову характеристику вакуумного тріода. Анодний струм в іонному приладі наростає поступово тільки в межах його дуже малих значень. При досягненні I_{a3} , що відповідає сітковій напрузі U_{c3} , плавне наростання струму переходить в стрибок і струм зростає до значення I_a , яке залежить від параметрів

зовнішнього ланцюга. Стрибок струму відповідає запалюванню дуги в приладі. Після стрибка струм залишається постійним незалежно від зміни сіткової напруги U_c . Струм не змінюється також, якщо U_c в сітковому ланцюзі зменшувати і зробити його навіть більш негативним, ніж це відповідало вихідним значенням.

Горизонтальний хід характеристики після запалювання розряду свідчить про припинення дії сітки після запалювання дуги.

Розглянемо процеси, що пояснюють дію сітки (рис. 5.8).

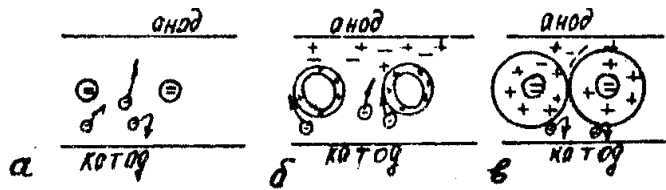


Рис. 5.8. Електричні потоки, що йдуть від катоду до сітки: а – до запалювання дуги; б – при горінні дуги; в – у момент відновлення запирання.

До запалювання дуги. Змінюючи потенціал сітки в цей період можна змінювати струм в обмежених межах. Зменшуючи негативний потенціал, можна збільшувати струм за рахунок посилення електронного потоку, що проходить через сітку. Але на відміну від тріода посилення електронного потоку відбувається в тиратроні не тільки за рахунок ослаблення гальмуючого поля сітки, а й за рахунок деякої компенсації негативного об'ємного заряду іонами, що виникають при іонізації атомів газу електронами, які проходять до аноду.

Початкова іонізація відбувається в просторі сітка-анод. Звідси іони направляються до стержнів сітки, частково екрануючи її негативне поле. Частина іонів проходить через сіткові отвори, компенсуючи негативний об'ємний заряд в просторі сітка-анод. До точки $I_{a,3}$, $U_{c,3}$, кількість електронів, що проникає в простір сітка-анод, все ж мала, тому кількість створюваних ними іонів і їх екрануюча та компенсуюча дія в цій стадії малі.

У сіткових отворах і просторі сітка-катод превалює негативне поле сітки, і тому тиратрон залишається замкненим. При наближенні до точки $I_{a,3}$ електронний потік через сітку зростає. Іонний потік, що екранує поле сітки і компенсує

негативний об'ємний заряд, наростає. Все це відбувається миттєво, і процес закінчується запалюванням розряду. Після запалювання дуги біля сітки виникає іонна оболонка, що має малу товщину, тому що концентрація іонів в плазмі та оболонці велика ($10^{11} \dots 10^{12}$ зарядів в 1 см^3). Іони в оболонці безперервно йдуть до сітки, де вони нейтралізуються з електронами, що приходять з сітковою ланцюга. Для обмеження струму в ланцюзі сітки ставлять опір R_c . При зміні U_c на сітці змінюється сітковий струм, але товщина іонної оболонки і падіння напруги в ній змінюються слабо. Цим і пояснюється те, що після запалювання дуги зміна за значенням і знаком сіткової напруги U_c не позначається на ході процесу і значенні I_a . Мається на увазі сітка з не дуже малою проникністю і в сітці значення U_c не надто великі.

Після гасіння розряду сітка відновлює свої управляючі властивості не відразу, а після деякого часу – деіонізації. Цей час необхідний для зменшення концентрації іонів, що оточують сітку до тих пір, поки позитивне поле іонів стає слабкішим за негативне поле сітки в сітковому отворі.

Концентрація іонів в оболонці зменшується в часі, тому що послаблюється концентрація зарядів у плазмі. По мірі ослаблення концентрації іонів в оболонці, ростуть її розміри. Коли товщина оболонки досягає половини ширини щілини, тобто дві зустрічно наростаючі оболонки в одному і тому ж отворі приходять в зіткнення, в центрі отвору починає з'являтися надмірний негативний потенціал. Це відповідає початку відновлення сіткового замикання. Потім, при поступовому зменшенні концентрації іонів, негативне поле сітки в сітковому отворі превалює над полем іонів, що дає результуюче негативне поле, здатне загальмувати електрони при їх підході до сіткового отвору, ускладнюючи тим самим виникнення розряду. Аноду, при цьому, можна надавати невеликий позитивний потенціал без побоювання виникнення розряду. Потім значення U_a збільшують. Момент, що визначає можливість підйому U_a до номінального, без відновлення дугового розряду, визначає час відновлення замикаючих властивостей тиратрона. Цей час визначає частоту і коефіцієнт потужності в різних пристроях.

Описаний метод електростатичного керування базується, таким чином, на тому, що наданий сітці великий негативний потенціал замінюється в момент відмикання на позитивний, для того, щоб забезпечити проходження через сітку достатньої для запалювання основного розряду кількості електронів.

При струмовому керуванні поле анода настільки заекрановане від області сітка-катод, що для збільшення кількості електронів, що проходять через сіткові отвори, сітці необхідно надавати позитивні потенціали, так, щоб між сіткою і катодом міг виникнути підготовчий розряд, який є постачальником електронів в простір сітка-анод.

Через те, що кількість електронів, які дифундують і дрейфують в область сітка-анод, залежить від концентрації зарядів у плазмі підготовчого розряду, пропорційній сітковому струму, момент запалювання основного розряду визначається тут сітковим струмом.

Кількісний зв'язок між анодною і сітковою напругами, які відповідають моменту запалювання розряду при електростатичному способі управління, відображає характеристика запалювання, показана на рис.5.9 а.

Анодно-сіткова характеристика визначає межу переходу від замкненого стану тиратрона до відкрито.

В режимі струмового керування пускова характеристика визначає залежність сіткового струму від анодної напруги (рис. 5.9, б).

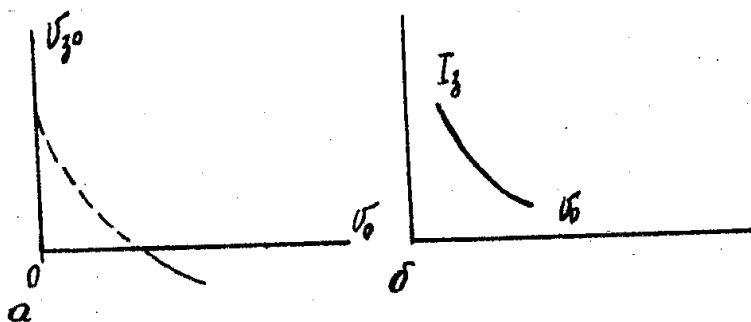


Рис. 5.9. Характеристики запалювання при електростатичному (а) та струмовому (б) управліннях.

З характеристики, зображеної на рис. 5.10 видно, що до точки А (при великих негативних потенціалах) струму немає. При деякому потенціалі U_{c1} анодний струм I_a , що не перевищує кілька мікроампер, стрибком зростає до значення, яке визначається властивостями катода і зовнішнім ланцюгом, а потім залишається незмінним, при будь-яких змінах потенціалу сітки. Такий хід залежності $I_a = f(U_c)$ після запалювання розряду (пряма СД) свідчить про припинення дії сітки на розрядний струм.

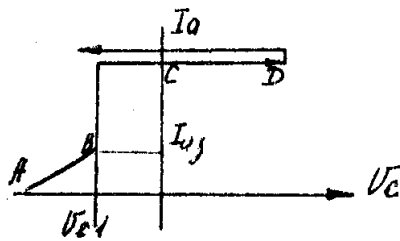


Рис. 5.10. Вплив потенціалу на характеристику тиратрона

Характеристики запалювання мають зміщення через вплив роду газу, тиску, температури катода (струму навантаження) (рис. 5.11).

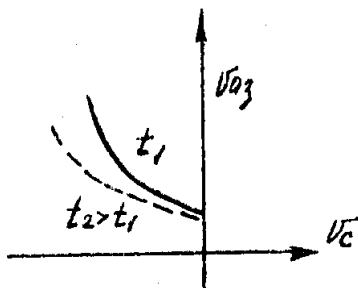


Рис. 5.11. Вплив температури оточуючого середовища на пускову характеристику тиратрону.

Положення пускової характеристики тиратрона визначається також опором у ланцюзі сітки, тому що сітковий струм впливає на потенціал сітки і час деіонізації.

На рис.5.12 показані статичні пускові характеристики, зняті при різних опорах в ланцюзі сітки.

Як видно з рис.5.12, зі збільшенням опору в ланцюзі сітки пускові характеристики зсуваються також вліво. Це особливо позначається при роботі тиратрона в схемі змінного струму. Це пояснюється появою предрозрядного струму

в ланцюзі сітки. Він виникає внаслідок того, що в негативний напівперіод деіонізація відбувається не миттєво, а триває деякий час, протягом якого іони з плазми продовжують надходити на негативно заряджену сітку, тим самим створюючи сітковий струм. Чим більше буде анодний струм і чим вище частота змінної напруги, тим сильніше передрозрядний струм сітки. Цей струм збільшується за рахунок термоелектронної емісії з сітки, яка нагрівається в режимі змінного струму ще більше. Емісія з сітки особливо зростає, якщо на сітку потрапляє барій, що випарувався з катода. Щоб відбулося запалювання тиратрона, на сітку необхідно подавати більш високу негативну напругу, ніж в статичному режимі (пускова характеристика зміщується вліво).

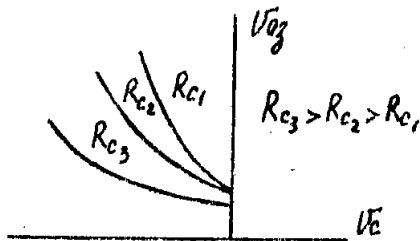


Рис. 5.12. Вплив опору в ланцюзі сітки на пускову характеристику лівого тиратрону.

Таким чином, залежно від робочого режиму тиратрона пускова характеристика буде змінювати своє положення; найбільш крайні її положення і визначають пускову область (рис.5.13).

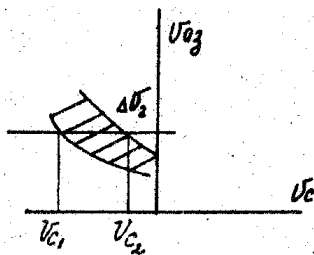


Рис. 5.13. Пускова область тиратрона (її ширина).

Ширина пускової області в вольтах сіткової напруги береться в якості одного з параметрів тиратрона. Після запалювання розряду вольт-амперна характеристика тиратрона, тобто залежність $U_a = f(I_a)$ при $U_c = const$, така ж, як і в газотрона.

Відмінність полягає лише в тому, що у тиратрона аодна напруга запалювання залежить від сіткового напруги: точка запалювання розташована тим вище, чим вище негативна напруга на сітці (рис. 5.14) Слід ще раз зауважити, що після запалювання напруга на тиратроні знижується до значення, що визначається падінням напруги між електродами при дуговому розряді (15...20 В).

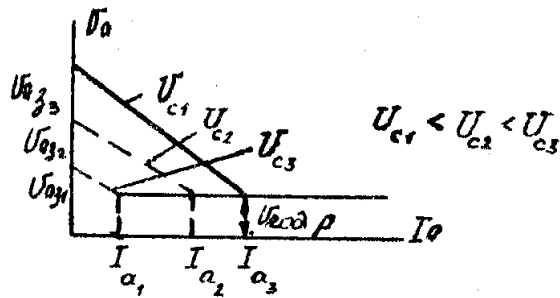


Рис. 5.14. Вольт-амперна характеристика тиратрона.

Крім тиратронів з одного сіткою, існують тиратрони з додатковою екрануючою сіткою, зазвичай з'єднаної з катодом.

При досить високій анодній напрузі в односітковому замкненому тиратроні створюються сприятливі умови для виникнення самостійного тліючого розряду. Позитивні іони в просвітах сітки створять іонні шари і позбавлять сітку її керуючої дії на розряд. Для усунення цього, можна сказати, шкідливого явища і для підвищення граничної анодної напруги під час позитивного на півперіоду, вводиться ще одна екрануюча сітка, що має окремий вивід. Екрануюча сітка – екран, що охоплює з усіх боків анод. Подаючи на неї різні (за знаком) потенціали, можна впливати на положення пускової характеристики. Наприклад, при зростанні позитивного потенціалу на екрані, запалювання тиратрона полегшується і пускова характеристика зміщується в область більш негативних напруг керуючої сітки.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою, параметрами і цокльовкою тиратрона.
2. Зібрати схему для зняття характеристики тиратрона.
3. Перевірити наявність в анодному ланцюзі баластного (обмежувального) опору R_a .

4. До включення анодної напруги прогріти катод тиратрона, для чого включити розжарення. Час прогріву зазначений в паспортних даних приладу.

5. При будь-яких перемиканнях у схемі (наприклад, при зміні R_c) обов'язково вимикати анодну напругу.

6. Зняти анодно-сіткові характеристики $I_a = f(U_c)$, $U_a = const$. Спочатку слід при $U_a = 0$ встановити великий негативний потенціал U_c , а потім потрібну анодну напругу $U_a = const$. Зняти при трьох значеннях U_a .

7. Зняти пускові характеристики. Встановити при $U_a = 0$ певне значення напруги на сітці U_c (починаючи з малих негативних значень), потім підвищувати анодну напругу до запалювання розряду в тиратроні. Момент виникнення розряду контролюється по міліамперметру в анодному ланцюзі. Значення $U_{a.з}$ вимірювати при розімкнутому анодному ланцюзі.

8. Вольт-амперні характеристики тиратрона зняти при трьох напругах на керуючій сітці U_c . Точка запалювання розташована тим вище, чим більше негативний потенціал на керуючій сітці U_c . При більш високому значенні U_a після виникнення розряду встановлюється відповідно більший анодний струм I_a .

Зміст звіту

1. Схема випробувань тиратрону.
2. Таблиці експериментальних даних.
3. Анодно-сіткові характеристики $I_a = f(U_c)$ тиратрона при різних анодних напругах.
4. Пускові характеристики $U_{a.з} = f(U_{c1})$ тиратрона для різних опорів в ланцюзі керуючої сітки.
5. Пускові характеристики $U_{a.з} = f(U_{c1})$ тиратрона при різних потенціалах екранної сітки U_{c2} .
6. Вольт-амперні характеристики $U_a = f(I_a)$ тиратрона при декількох значеннях напруги на керуючій сітці.

7. Висновки.

Контрольні запитання

1. Будова тиратрону. Чим відрізняються різні типи тиратронів?
 2. Який вид розряду спостерігається у приладі? Для чого він слугує в тиратроні?
 3. Чому і коли сітка може втратити свою керуючу дію?
 4. Анодно-сіткова характеристика тиратрона.
 5. Який вид має крива розподілу потенціалу між електродами?
 6. Поясніть процеси в катодній області в режимі недорозжарення та перерозжарення.
 7. Поясніть процеси в позитивному стовпі. Параметри плазми.
 8. Поясніть процеси в анодній області.
 9. Від яких факторів залежить час відновлення керуючої дії сітки?
 10. Що таке пускова область тиратрона? Причини розбросу пускової характеристики.
 11. Як впливає опір в ланцюзі сітки анодного струму і частота на положення пускової характеристики?
 12. Поясніть вольт-амперну характеристику тиратрона.
- [1;6].

Лабораторна робота 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ГПС-16

Мета роботи – ознайомитися з будовою, параметрами і характеристиками, принципом дії газорозрядної матричної панелі з самоскануванням розряду; зі стендом випробувань, призначенням основних блоків; дослідити роботу панелі в режимі введення буквено-цифрової інформації.

Короткі теоретичні відомості

Будова і принципи роботи панелі зі самоскануванням

Існують різноманітні типи газорозрядних індикаторних панелей (ГП). Встановилася певна класифікація ГП, в основу якої лягли різні ознаки. Так, за конструктивними ознаками і принципом дії вони поділяються на три основні групи: панелі змінного струму, постійного і з само скануванням.

Для ГП зі самоскануванням (ГПС) характерні:

- системи електродів, що мають гальванічний контакт з плазмою;
- вбудований реєстр зсуву;
- простота схеми керування;
- простота способу модуляції яскравості.

Панелі зі самоскануванням можна розглядати як прилади, що складаються з сукупності функціональних комірок (ФК), додаючи або віднімаючи які, можна змінювати інформаційну ємність панелей.

Структурно ГПС складається з двох основних частин, пов'язаних всередині приладу одна з одною: індикаторної, де формується зображення, і скануючої, в якій здійснюється розгортка зображення. Індикаторна частина формується з безлічі комірок індикації (КІ), а скануюча – з комірок сканування (КС), розташованих по рядках і стовпчиках. КІ і КС пов'язані всередині приладу певним чином і становлять функціональну комірку.

На кожну КС і КІ припадають свої ділянки катодів і анодів електродних підсистем. При роботі панелі в одній з КС кожного рядка горить газовий розряд, який під дією зовнішньої схеми починає послідовно перекидатися від однієї КС рядка до іншої в напрямку від нульової КС до останньої. Коли припиниться розряд в останній КС запалюється нульова КС, і цикл повторюється, тобто проходить сканування розряду. Цей процес подібний розгортці променя ЕПТ, тільки тут розгортка відбувається по всіх рядках одночасно.

Включені КС управляють пов'язаними з ними КІ, сприяючи їх запалюванню. Якщо на підсистему електродів індикаторної частини від схеми управління подати імпульси, загоряються тільки ті КІ, які пов'язані з палаючими КС. Функціонально цей процес еквівалентний модуляції променя в ЕПТ.

З тих КІ, що світяться після запалювання розряду, синтезується зображення. Найважливіша відміна особливості панелі з самоскануванням в тому, що з двох комірок, що знаходяться під однією різницею потенціалів, запалюється не довільна, а певна задана комірка. На рис.6.1 зображені дві комірки Я1 і Я2 з ідентичними параметрами.

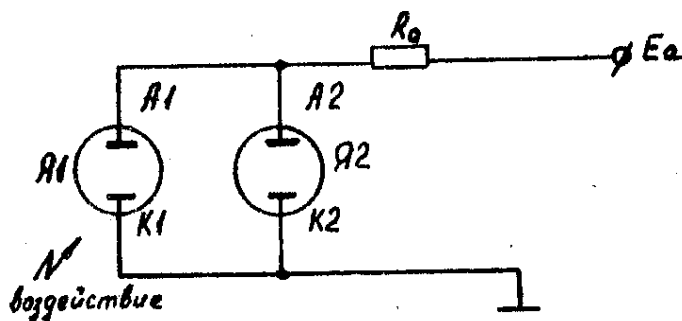


Рис. 6.1. Схематичне зображення об'єднаних ідентичних газорозрядних комірок.

Якщо на ці дві комірки подати напругу E_a , достатню для запалювання розряду, ймовірність запалювання розряду в Я1 (P) буде дорівнювати ймовірності запалювання розряду в Я2, тобто $P=1/2$.

Після запалювання розряду в одній з комірок напруга на іншому аноді падає до напруги підтримки розряду в комірці, яка пробилася. Цієї напруги недостатньо

для запалювання розряду в другій комірці. Для того щоб ймовірність запалювання Я1 прямувала до одиниці, необхідно до Я1 докласти додатковий зовнішній вплив:

1) опромінення світлом відповідної довжини хвилі, що призведе до зниження статичного часу запізнювання запалювання розряду і відповідно більшої ймовірності запалювання розряду в Я1 в порівнянні з Я2, або зниження напруги виникнення розряду Я1 для певних типів газового наповнення.

2) ввід заряджених частинок в Я1, що понизить напругу запалювання Я1 и, відповідно, забезпечить більшу ймовірність запалювання Я1 в порівнянні з Я2.

3) вплив обома чинниками – випромінюванням і інжекцією заряджених частинок.

У ГПС реалізуються обидва способи підготовки. Перший використовується при підготовці комірок індикації комірками сканування, другий при підготовці КС.

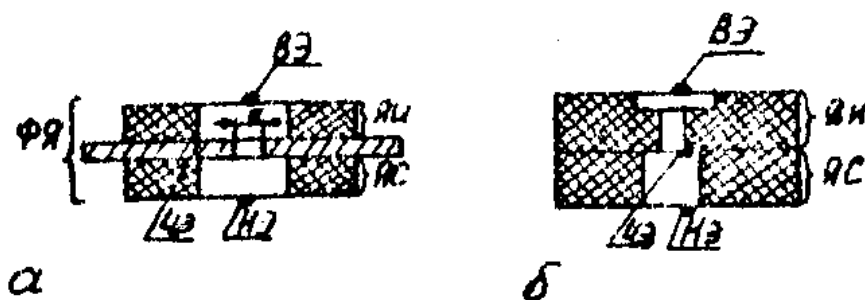


Рис. 6.2. Приклади конструкції функціональних комірок:

а – з інжекційними отворами; б – з каналами зв'язку; ВЕ – верхній електрод; ЦЕ – центральний; НЕ – нижній.

Конструктивно зв'язок між КІ та КС в ГПС може виконуватися:

через отвір малого діаметру (інжекційний отвір, (рис. 6.2, а);

канали зв'язку (рис. 6.2, б).

До складу КІ входять верхній електрод ВЕ, звернена до нього поверхня центрального електрода ЦЕ та отвір в діелектричному ізоляторі, що розділяє електроди. До складу КС – нижній електрод НЕ, звернена до нього поверхня ЦЕ, та отвір в діелектричному ізоляторі, що розділяє електроди. Обидві комірки пов'язані одна з одною інжекційним отвором в ЦЕ.

Розглянемо конструкцію панелі з самоскануванням. Скануюча частина містить аноди сканування, що виготовляються з тонкого дроту та катодну систему електродів, загальну для всіх анодів сканування (рис. 6.3 а, б). Катодна система виготовляється з тонкої металевої стрічки методом фотолітографії і складається з безлічі катодних смужок, розташованих перпендикулярно до анода сканування та об'єднаних за допомогою розвідної шини, і одного нульового катода K_0 . Для панелі на 16 знакомісць катодні смужки об'єднані в три групи (1 гр, 2 гр, 3 гр.) Катодна система електродів впритул притискається до нижньої скляної пластини, при цьому працюючі – ті ділянки катодів, які обмежені пазами, прорізними в склі. Аноди сканування укладають на дно пазів таким чином, що один паз доводиться на один анод. В результаті утворюються ізольовані один від одного розрядні канали з індивідуальними анодами і загальною катодною системою електродів.

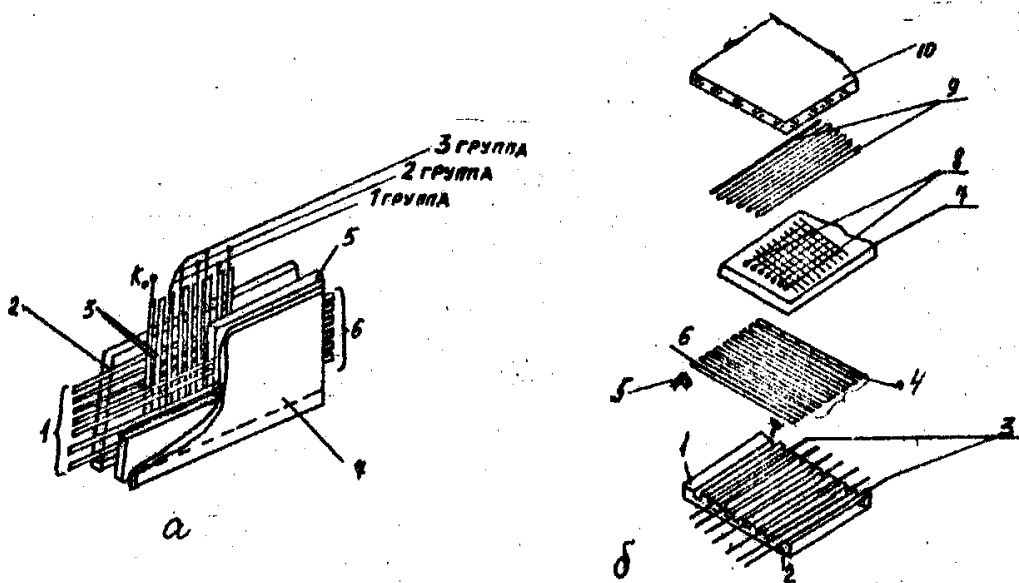


Рис. 6.3. Схематичне зображення:

а – конструкції панелі з само скануванням: 1 – аноди сканування; 2 – нижня скляна пластина; 3 – інжекційні отвори; 4 – катодна система електродів; 5 – діелектрична матриця; 6 – аноди індикації; 7 – верхня скляна пластина;

б – конструкція ГПС: 1 – нижня пластина; 2 – канавки; 3 – аноди сканування; 4 – катоди; 5 – катоди підпалу; 6 – катод скидання; 7 – діелектрична матриця; 8 – інжекційні отвори; 9 – аноди індикації; 10 – верхня скляна пластина.

Таким чином, скануюча частина панелі уявляє собою сукупність безлічі декатронів з лінійним розташуванням електродів. Для підключення до електричної схеми від скануючої частини відводяться три виводи від груп катодів та по одному виводу від K_0 і анодів сканування, об'єднаних через резистори.

Індикаторна частина містить аноди індикації, виготовлені із тонкого дроту і діелектричну матрицю з отворами. Діелектрична матриця з лицьового боку, зверненому до оператора, зачорнена для підвищення контрасту. Стінки комірок діелектричної матриці для збільшення кута огляду – білі. Аноди індикації розташовані на матриці і проходять уздовж осі розташування отворів рядку паралельно анодам сканування. Діаметр анодів індикації значно менше діаметра отворів в матриці, тому вони не перекривають отвори, і оператор добре бачить світіння комірок індикації. Кількість виводів індикаторної панелі дорівнює кількості анодів індикації.

Катодна система електродів – загальна і бере участь в роботі обох частин панелі. Скануюча і індикаторні частини панелі сполучаються через інжекційні отвори, виконані в катодах методом фотолітографії, або лазерної прошивкою. Всі складені деталі створюють щільну упаковку і з комірок сканування формуються функціональні комірки. Зверху панель закривається лицьовим склом і по периметру герметизується “склокристалічним” цементом. На нижній пластині, крім того, розташований штенгель для відкачування та наповнення сумішшю на основі неону і ксенону з додаванням парів ртуті.

Конструктивні елементи панелі повинні відповідати вимогам, що пред'являються до сучасного індикаторного приладу: забезпечення заданих тактико-технічних параметрів, висока надійність роботи, тривалий термін служби та ін.

Від газового наповнення залежать такі світлотехнічні характеристики, як колір, яскравість, електричні параметри, а також термін служби панелі.

Важливий момент в обґрунтуванні конструкції приладу – вибір діаметра інжекційного отвору. З одного боку, діаметр повинен бути досить великий, щоб через отвір проходила необхідна інжекція заряджених частинок і технологія виготовлення отворів була порівняно простою, а з іншого, – діаметр інжекційного

отвору обмежений вимогою малого паразитного підсвічування і відсутністю проникнення розряду з комірки сканування в комірку індикації.

Для простоти принцип роботи панелі покажемо на прикладі функціонування тільки одного рядка (рис. 6.4, а). Робота інших рядків аналогічна. Розряди переміщуються в усіх рядках паралельно і практично одночасно.

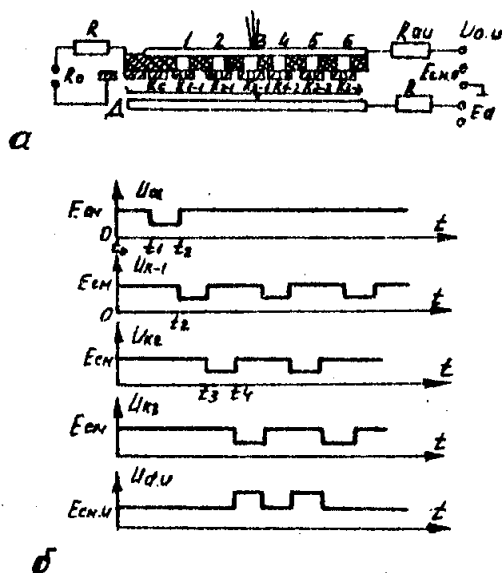


Рис. 6.4. Схема підключення одного рядка ГПС: розряду (а) і діаграми напруги на електродах (б).

Катооди груп K1, K2, K3 приєднані до трьох шин схеми керування з напругами U_{K1} , U_{K2} , U_{K3} . При включенні джерела живлення E_a виникає розряд лише в системі чергових електродів Д. Цей розряд постійно підтримується і використовується як джерело початкової іонізації, дія якого локалізована в області катода скидання K_0 . Розряд на інших катодах звичайно не переходить.

Багатостійка схема управління формує імпульси U_{K1} , U_{K2} , U_{K3} . Імпульс на катод скидання K_0 виникає в інтервалі часу $t_1 - t_2$. При цьому завдяки підготовчій дії чергового розряду на катоді скидання досить швидко виникає розряд. Після закінчення імпульсу скидання розряд на K_0 припиняється, одночасно в інтервалі часу $t_1 - t_2$ подається імпульс на катод K1, який призводить до перенесення розряду на катод K1-1, розташований найближче до K_0 . Аналогічним чином закінчення

імпульсу на K1 і початок імпульсу на K2 призводить до перенесення розряду на K2-1, закінчення імпульсу на K2 і початок імпульсу на K3 – до перенесення розряду на K3-1 і т.д. Таким чином, при перемиканні керуючої схеми з трьома стійкими станами відбувається спрямоване перенесення (сканування) розряду вздовж рядка, що містить будь-яку кількість електродів, об'єднаних у три групи. Після досягнення розрядом останнього з електродів рядка, виробляється імпульс скидання, розряд повертається на Kс, після чого цикл повторюється.

Через малі розміри отворів в катодах, світіння скануючого розряду практично не сприймається оператором. Для створення зображення використовується світіння, що виникає в отворах діелектричної матриці (комірки 1 – 6). З цією метою на певних тактах на індикаторний анод подають імпульси напруги U_{ai} , в результаті дії яких запалюється комірка, навпроти якої в даному такті існує розряд. Завдяки наявності резистора R_a напруга між анодом індикації і катодом стає менше напруги виникнення розряду, чим запобігається можливість перекидання розряду на інші катоди. Через те, що індикаторний катод проходить через всі комірки даного рядка, для надійного вибору комірки напруга виникнення розряду має значно знижуватися під дією підготовчого розряду.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою і призначенням всіх електродів ГПС-16. Замалювати його конструкцію в схематичному вигляді.
2. Виписати паспортні дані з таблиці і вказати по ним граничні значення для кожного пункту завдання.
3. Ознайомитися з лабораторним макетом для дослідження ГПС-16.
4. Виміряти максимальне і мінімальне значення напруги живлення анодів сканування.

Вимірювання U_{\max} і U_{\min} напруги живлення анодів сканування здійснюють на установці, зображеній на рис.6.5.

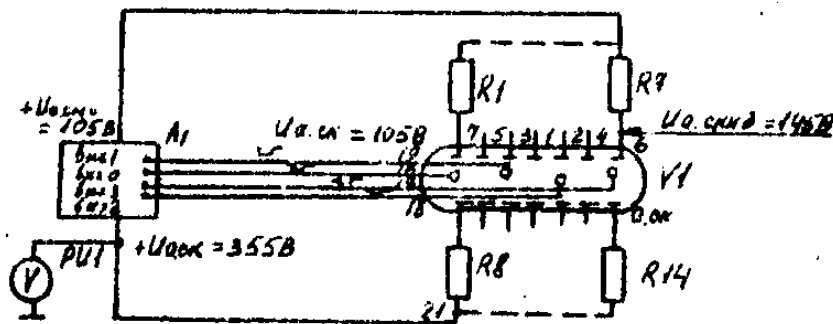


Рис. 6.5. Схема електричної установки для вимірювання напруги живлення анодів сканування: A_1 – стенд для вимірювання параметрів; $PV1$ – вольтметр 0 ... 500 В, клас 1,5; $R1...R7$ – резистор 51 кОм $\pm 5\%$, 0,5 Вт; $R8...R14$ – резистор 330 кОм $\pm 5\%$, 0,5 Вт (змонтовані на корпусі панелі); $V1$ – панель випробувана.

Плавню збільшуючи напругу живлення, визначають значення, при яких забезпечується повна і стабільна засвітка індикаторного поля.

5. Зняти вольт-амперну характеристику комірки панелі:

а) переключити рід роботи в положення "Ісп.", тумблер – переключити в положення "300 В";

б) ручками "Яскравість" і " $U_{a.інд}$ " зменшити яскравість до мінімуму;

в) натиснути перемикач І "Аноды индикации";

г) тумблер "Струм анодов" переключити в положення "3 мА";

д) ручки "Частота, кГц", "Затримка $U_{a.інд}$ " і "Длит. имп. сброса" поставити в середнє положення;

е) перемкнути тумблер "Контроль U " в положення "450 В". Вставити в межах 340 ... 360 В. Переключити тумблер "Контроль U " в положення "300 В". Зняти ВАХ $I_{інд} = f(U_{a.інд})$ при $U_{a.ск} = 340, 350, 360$ В. Змінювати $U_{a.інд}$ від 150 до 260 В.

Примітки. Напругу $U_{a.ск}$ виміряти при перемиканні тумблера "Контроль U " в положення "450 В".

Напругу $U_{a.інд}$ виміряти в положенні тумблера "300 В";

ж) оцінити розкид по напрузі горіння.

6. Підключити "Частотомір". Оцінити граничну частоту сталої роботи, при якій не виникає мигтіння.

7. Поставити перемикач в положення "Раб.", а "Розділення знакомість" вимкнути.

8. Провести набір цифрової інформації.

9. Провести набір літерної інформації.

10. Визначити тривалість імпульсів напруги скидання.

11. Визначити амплітуду імпульсів напруги індикації.

Зміст звіту

1. Схематичне зображення конструкції дослідженої панелі ГПС-16. Короткий опис принципу роботи і технології виготовлення.
2. Блок-схема лабораторної установки. Призначення основних блоків із зазначенням їх параметрів.
3. Таблиці отриманих даних в лабораторній роботі.
4. Розрахунки параметрів.
5. Висновки.

Контрольні запитання

1. Структурна будова панелі з самоскануванням.
2. Поясніть принцип роботи ГПС.
3. Режими роботи функціональної комірки.
4. Умови працездатності ГПС.
5. Особливості механізму внутрішнього зв'язку між комірками.
6. Принцип роботи скануючої і індикаторної частин приладу.
7. Який розряд використовується в індикаторних приладах?
8. Назвіть статичні і динамічні параметри ГПС.
9. Поясніть зв'язок електричних параметрів з конструкцією приладу.
10. Де знайшли застосування ГПС?

[7 – 9].

Лабораторна робота № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ВАКУУМНОГО ТРІОДУ

Мета роботи: вивчити фізичні процеси, що визначають характеристики і параметри тріода як активного елементу електронної ланцюга; набути навичок експериментального визначення параметрів приладу, вміння провести розрахунок, вибрати доцільний режим роботи тріода, виконати інженерну обробку результатів вимірювань.

Короткі теоретичні відомості

Тріод – найпростіша приймально-підсилювальна лампа, в якій між катодом і анодом розташований керуючий електрод – сітка.

1) Керуюча роль сітки

За відсутності сітки при позитивному потенціалі анода в проміжку катод-анод діє прискорююче електричне поле. У поверхні катода знаходиться електронна хмара, просторовий заряд, створений електронами, емітованими з катода, що обумовлює наявність потенційного мінімуму у катода. Анода досягають ті електрони, які під дією його прискорюючого поля виявляються в змозі подолати потенційний мінімум.

В такому двоелектродному приладі на анод треба докласти порівняльно велику напругу, щоб отримати необхідну зміну струму: при зниженні потенціалу анода струм зменшується, при підвищенні – збільшується.

Якщо керуючий електрод помістити в безпосередній близькості від катода, керування струмом буде відбуватися більш ефективно. Зміна потенціалу сітки на 1 В викличе більшу зміну анодного струму, ніж така ж зміна напруги на аноді.

Отже, сітка керує анодним струмом більш ефективно, ніж анод, тому що вона розташована значно ближче до джерела електронів і, крім того, силові лінії електричного поля сітки всі замикаються на катоді, а силові лінії поля анода частково замикаються на сітці, тобто електричне поле анода екранується сіткою.

Ці обставини складають фізичну основу підсилювальних властивостей тріода.

Анодний струм у тріоді є функція двох напруг – на сітці і на аноді

$I_a = \varphi(U_c, U_a)$. Напруга розжарення у всіх режимах роботи тріода повинна підтримуватися постійною, що забезпечує існування режиму просторового заряду у катода (РПЗ) у всьому діапазоні зміни напруги на аноді.

Для отримання необхідного підсилювального ефекту в анодний ланцюг повинне бути включене навантаження. В результаті в процесі роботи тріода при зміні напруги на сітці змінюється анодний струм, що викликає зміну падіння напруги на навантаженні. Це в свою чергу викликає зміну потенціалу анода.

Таким чином, в робочому режимі анодний струм тріода є функцією двох складно змінюваних змінних напруг, коли напруга на аноді змінюється внаслідок зміни напруги на сітці.

Вивчити цю складну залежність зручно таким чином: спочатку розглянути залежність анодного струму від напруги на сітці, вважаючи анодну напругу постійною, потім – від напруги на аноді, вважаючи сіткову напругу постійною.

Ці залежності можуть бути легко отримані експериментально і називаються статичними характеристиками і параметрами тріода.

Статичні характеристики тріода – це залежності:

$I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ – анодно-сіткова характеристика;

$I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$ – анодна характеристика.

Для кількісної оцінки залежності анодного струму від потенціалів сітки вводять поняття діючого потенціалу. Сукупну дію на електрони у катоду, сітки і анода замінюють (умовно) дією одного електрода, розташованого на місці сітки реального тріода. До цього електрода прикладена деяка еквівалентна напруга U_g – діюча напруга, тобто реальний тріод зводиться до еквівалентного діода.

Для діода відношення між струмом і напругою в режимі просторового заряду відомо. Це закон «ступеня 3/2».

Для еквівалентного діода, а отже, і для тріода цей закон можна записати так:

$$I_K = G U_g^{3/2}, \quad (7.1)$$

Де I_K – повний струм, що йде від катода; G – імпеданс тріода; $U_g^{3/2}$ – діюча напруга тріода.

У тріоді частина електронів потрапляє на витки сітки, складаючи струм сітки I_c . Велика частина електронів йде на анод, складаючи струм анода I_a . Повний катодний струм дорівнює сумі струму анода і струму сітки:

$$I_K = I_a + I_c. \quad (7.2)$$

Діюча напруга в тріоді дорівнює сумі напруги на сітці і напруги на аноді, збільшеного в D раз:

$$U_g = U_c + DU_a. \quad (7.3)$$

Величина D називається проникністю сітки тріода, або проникністю. Вона враховує екрануючу дію сітки для поля анода. Чим густіше сітка, тим менше її проникність. Кількісно для керуючої сітки $D = 0,1 \dots 0,01$. Це безрозмірна величина.

Закон «ступеня 3/2» для тріода записується так:

$$I_K = G(U_c + DU_a)^{3/2}. \quad (7.4)$$

Коефіцієнт G має розмірність провідності і залежить від геометрії лампи.

Звідси можна теоретично визначити характер залежності струму в тріоді від напруг на сітці і аноді, тобто вид характеристики тріода.

2) Анодно-сіткові характеристики тріода

Уявляють собою залежність анодного струму від напруги на сітці при постійній напрузі на аноді: $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$.

Проаналізуємо вираз закону «ступеня 3/2».

При постійній напрузі на аноді другий член в дужках буде визначати початок характеристики по вісі напруги, а вид функціональної залежності струму від напруги – напівкубічна парабола.

Це формальний аналіз. Анодно-сіткові характеристики показані на рис. 7.1.

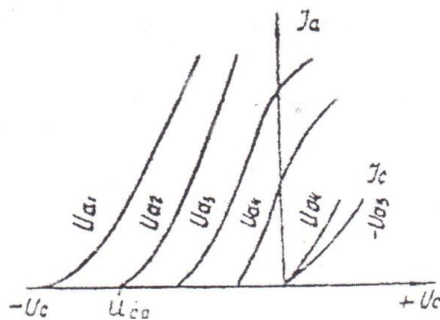


Рис 7.1. Анодно-сіткові характеристики тріода.

Тут зображено сімейство характеристик для різних значень напруги на аноді: $U_{a1} > U_{a2} > U_{a3}$. Фізично анодно-сіткові характеристики пояснюються наступним чином. При напрузі на аноді U_{a1} анодний струм зростає зі збільшенням потенціалу сітки. (В робочому режимі на сітку подається негативна напруга). Підвищення потенціалу сітки відбувається при зменшенні за абсолютною величиною негативної напруги на сітці.

При збільшенні негативного напруги на сітці зменшується кількість електронів, здатних подолати потенційний мінімум і досягти анода. При деякому значенні напруги на сітці U_{c0} , що називається напругою замикання, анодний струм стає рівним нулю.

Напругу замикання можна визначити з формули (7.4), прирівнявши праву частину до нуля.

При негативній напрузі на сітці в її ланцюзі протікає незначний струм, обумовлений електронами, що випадково потрапили на витки. Траєкторія основної маси електронів огинає витки сітки, відштовхуючись від негативних металевих поверхонь.

Такий режим струморозподілу називається режимом прямого перехоплення. В цьому режимі $I_c \cong 0, I_k = I_a$. Вираз (7.4) можна записати для анодного струму тріода в такому вигляді:

$$I_a = G(U_c + DU_a)^{3/2}. \quad (7.5)$$

При напрузі замикання, коли $I_a = 0$, напруга на сітці

$$U_{c0} = -DU_a, \quad (7.6)$$

тобто напруга запирання визначається напругою на аноді і проникністю керуючої сітки.

Збільшення U_a викликає збільшення анодного струму і напруги замикання. На характеристиках це відбивається як паралельне зміщення характеристики вліво.

У режимі, коли потенціал на сітці стає позитивним, траєкторії електронів викривляються до витків сітки, значна кількість електронів потрапляє на сітку, складаючи сітковий струм. Струм сітки при заданому значенні U_c буде тим більше,

чим менша напруга в цей час буде на аноді. При $U_a < U_c$ електрони всі будуть вертатися на сітку. Такий режим струморозподілу називається режимом повернення. При позитивній напрузі на сітці характеристика йде більш полого, ніж при негативній напрузі (рис. 7.1).

3) Анодні характеристики

Уявляють собою залежність анодного струму від анодної напруги при постійній напрузі на сітці: $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$.

Загальний вид сімейства анодних характеристик зображений на рис. 7.2. Пояснити їх можна наступним чином. При $U_c = 0$ вираз (7.5) набуває вигляду $I_a = GU^{3/2}$, тобто збігається з виразом анодної характеристики діода і теоретично являє собою напівкубічну параболу. У реальних тріодів в силу ряду причин (нерівномірного розподілу поля сітки, нерівномірного нагрівання катода та ін.) на характеристиці більшу частину зростаючої ділянки можна вважати лінійною. При збільшенні негативної напруги на сітці анодний струм зменшується, оскільки збільшується гальмівна дія потенціалу сітки. На характеристиках це виражається як паралельне зміщення кривих вправо. При позитивній напрузі на сітці характеристика йде трохи інакше: вигинається вгору.

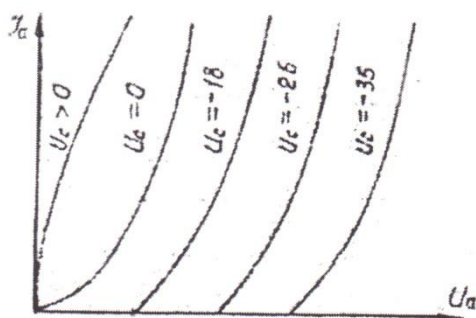


Рис. 7.2. Анодні характеристики тріода.

4) Статичні параметри тріоду.

Параметрами називають постійні величини, що встановлюють зв'язок між приростами напруг і відповідними приростами струмів.

Для оцінки підсилювальних властивостей тріода прийнято використовувати наступні параметри: S – крутизна; R_i – внутрішній опір; μ – коефіцієнт підсилення;

D – проникність.

Усвідомити фізичний зміст параметрів можна таким чином. Струм анода є функція двох змінних: $I_a = f(U_c, U_a)$.

Приріст струму можна записати у вигляді повного диференціала:

$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} dU_a. \quad (7.7)$$

При роботі на лінійній ділянці характеристики можна перейти від нескінченно малих приростів до кінцевих. Для невеликого змінного сигналу можна записати

$$U_{a\sim} = \frac{\partial I_a}{\partial U_a} U_{c\sim} + \frac{\partial I_a}{\partial U_c} U_{a\sim}.$$

Величина $\frac{\partial I_a}{\partial U_c}$, що виражає залежність анодного струму від напруги на сітці, називається крутизною анодно-сіткової характеристики або просто крутизною.

Експериментально крутизна вимірюється як приріст анодного струму dI_a при зміні напруги на сітці на 1 В.

$$S = dI_a / dU_c.$$

Числове значення крутизни змінюється від декількох одиниць до декількох десятків.

Величина $\frac{\partial I_a}{\partial U_c}$ має розмірність провідності. Параметром тріода є зворотна величина, яка називається внутрішнім опором: $Ri = \frac{\partial U_a}{\partial I_a}$.

Внутрішній опір тріода – від кількох сотень Ом до декількох килом. Добуток крутизни і внутрішнього опору становить параметр, який називається статичним коефіцієнтом підсилення:

$$\mu = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \frac{\partial U_a}{\partial I_a}, \quad \mu = \frac{\partial U_a}{\partial U_c} \text{ при } I_a = \text{const}.$$

Фізичний зміст такий. Коефіцієнт підсилення показує, у скільки разів зміна напруги на сітці впливає на анодний струм сильніше, ніж зміна напруги на аноді. (Фізичні причини були розглянуті).

Кількісно коефіцієнт посилення показує, на скільки вольт треба змінити напругу на аноді, щоб при зміні напруги на сітці на 1 В анодний струм залишився

постійним.

Проникність D визначається відношенням

$$D = \frac{\partial U_c}{\partial U_a}, \quad I_a = \text{const}$$

тобто аналітично це величина, зворотна коефіцієнту посилення. Фізичний зв'язок з коефіцієнтом підсилення є очевидним.

Основні параметри тріода пов'язані співвідношенням $\mu = SR_i$ або

$$SR_i B = 1. \quad (7.8)$$

Статичні параметри тріода визначають за експериментальними статичним характеристикам. При цьому використовують наведені формули, в яких замість нескінченно малих беруть кінцеві збільшення струмів і напруг.

На рис.7.3 як приклад показано визначення статичних параметрів по анодно-сітковим характеристикам.

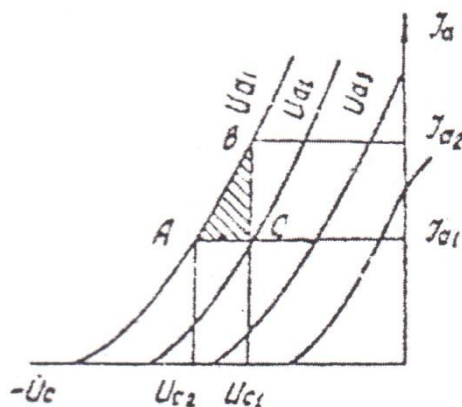


Рис.7.3. До експериментального визначенню параметрів.

Через точку C , в якій необхідно визначити параметри, проводять горизонтальну і вертикальну прямі до перетину з сусідніми характеристиками. Катети отриманого $\triangle ABC$ дають потрібні для обчислених параметрів зміни струмів і напруг. Зміна анодної напруги визначається як різниця значень анодних напруг, при яких зняті характеристики:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}, \quad U_a = \text{const}, \quad S = \frac{I_{a2} - I_{a1}}{U_{c2} - U_{c1}} = \frac{BC}{AC};$$

$$Ri = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}, \quad U_a = \text{const}, \quad Ri = \frac{U_{a1} - U_{a2}}{I_{a2} - I_{a1}};$$

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}, \quad I_a = \text{const}, \quad \mu = \frac{U_{a1} - U_{a2}}{U_{c2} - U_{c1}};$$

Аналогічно визначають параметри по сімейству анодних характеристик.

5) Динамічний режим роботи тріода.

Основне призначення тріода – посилення або генерація електричних коливань. Потрібний ефект досягається відповідним вибором опору навантаження і включенням додаткових пасивних елементів. У найпростішому вигляді підсилювальний каскад на тріоді зображений на рис. 7.4. Тут E_a – напруга анодного живлення; E_c – напруга зсуву на сітку, необхідна для вибору робочої точки початкового режиму роботи тріода; R_n – опір навантаження, для простоти вважаємо його чисто активним; U_c – напруга сигналу, що підсилюється.

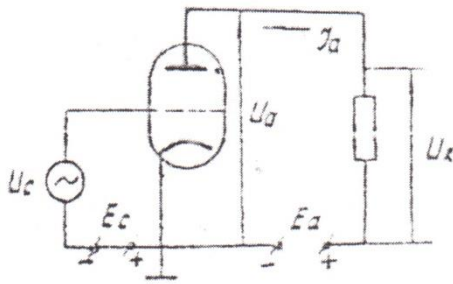


Рис. 7.4. Підсилювальний каскад тріода

Режим роботи тріода з навантаженням в анодному ланцюзі називається динамічним. Особливості його полягають в наступному. При збільшенні потенціалу сітки збільшуються анодний струм і падіння напруги на навантаженні, тобто потенціал сітки, анодний струм і напруга на навантаженні змінюються синфазно.

При збільшенні анодного струму збільшується падіння напруги на навантаженні, а анодна напруга зменшується:

$$U_a = E_a - R_n I_a,$$

$$U_a = E_a - U_R, \quad (7.9)$$

тобто зміна напруги на аноді знаходиться в протифазі зі зміною напруги на навантаженні. Зміни анодного струму і анодної напруги також протифазні.

а) Динамічна анодно-сіткова характеристика

При наявності опору навантаження зміна анодного струму при зміні напруги на сітці не буде виражатися статичної залежністю $I_a = f(U_c)$ при $U_a = const$, оскільки анодна напруга не залишається постійною, а змінюється за формулою (7.9)

Другим виразом для аналізу динамічного режиму є співвідношення (7.7), записане в наступному вигляді:

$$dI_a = S dU_c + \frac{1}{R_i} dU_a. \quad (7.10)$$

Вирази (7.9), (7.10) – основні для вивчення динамічного режиму.

Експериментально динамічна анодно-сіткова характеристика знімається так само, як і статична, але при включеному R_H (рис. 7.5). При підвищенні потенціалу сітки до U_{c1} анодний струм згідно статичній характеристиці повинен зрости до I_{a1} . Однак при цьому згідно (7.9) анодна напруга зменшилася і стала рівною U_{a2} , отже, анодний струм зменшився і став рівним I_{a2} . Динамічну анодно-сіткову характеристику можна представляти як результат переходу робочої точки з однієї статичної характеристики на іншу. Звідси випливає, що динамічна крутизна тріода менше, ніж статична. Кількісне співвідношення між ними виведемо нижче.

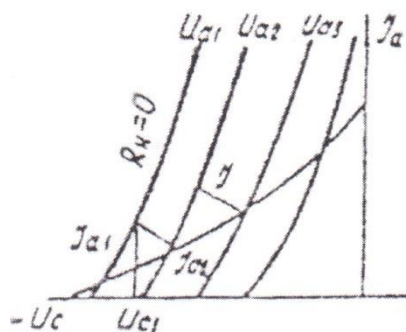


Рис.7.5. Побудова динамічної анодно-сіткової характеристики

б) Динамічна анодна характеристика.

Ця характеристика повинна дати відповідь на питання: яке значення анодного струму буде при даній напрузі на аноді, відомому навантаженні і відповідній напрузі на сітці; як зміниться анодна характеристика при зміні опору навантаження?

Відповідь на ці та інші важливі питання дає графо-аналітичний метод дослідження тріода з навантаженням. Суть методу полягає в наступному.

Є залежність анодного струму від напруги для лампи (це статичні характеристики) і залежність струму від напруги в навантаженні – це пряма лінія (для вибраного активного навантаження), яка називається навантажувальною прямою. Спільне графічний розв’язок цих двох залежностей дає відповідь на поставлені питання і містить інші важливі відомості.

Практично роблять так. На статичних анодних характеристиках будують навантажувальну пряму, як показано на рис. 7.6. Навантажувальну пряму будують на підставі виразу (7.9). Можна записати

$$I_a = \frac{E_a}{R_n} - \frac{1}{R_n} U_a. \quad (7.11)$$

Це пряма, кут нахилу якої визначається величиною $1/R_n$.

Побудувати її можна по двох точках. З віссю струмів навантажувальна пряма перетинається при $U_a = 0$, тоді відповідно до (7.11) $I_a = E_a/R_n$ з віссю напруг – при $I_a = 0$, тоді $U_a = E_a$.

Ця лінія являє собою геометричне місце значень анодного струму при наявності в анодному ланцюзі опору навантаження R_n та заданій напрузі живлення E_a . Це динамічна анодна характеристика (навантажувальна лінія).

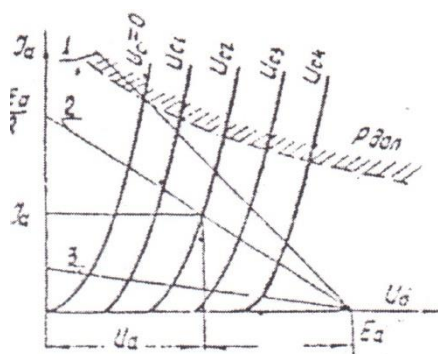


Рис. 7.6. Побудова динамічної анодної характеристики.

При зміні навантаження і нахилу динамічної анодної характеристики зміниться значення анодного струму. Навантажувальні лінії для різних значень

опору навантаження виходять з однієї точки і мають різний нахил. Навантаження обране вірно, якщо навантажувальна лінія не перетинає кривої допустимої потужності, а статичні анодні характеристики перетинає на лінійній ділянці (див. рис. 7.6, крива 2).

Проекція робочої точки А (при заданому значенні постійної напруги зміщення на сітці U_{c2}) на вісі координат визначає струм, що протікає в ланцюзі анода I_{a0} , напруги на аноді U_a і напругу на навантаженні.

в) Динамічні параметри тріода

1. Динамічна крутизна має той самий фізичний зміст, що і статична. Кількісне співвідношення динамічної та статичної крутизни визначається на підставі (7.9) і (7.10) наступним чином: $U_a = E_a - R_n I_a$. Продиференціювавши, отримаємо:

$$dU_a = -R_n dI_a. \quad (7.12)$$

Згідно (7.10) запишемо $dI_a = S dU_c + \frac{1}{R_n} dU_a$.

Підставивши в цей вираз (7.12) отримаємо

$$dI_a = S dU_c + \frac{R_n}{R_i} dI_a; dI_a \left(1 + \frac{R_n}{R_i} \right) = S dU_c; \frac{dI_a}{dU_c} \left(1 + \frac{R_n}{R_i} \right) = S.$$

Відношення перед дужкою є динамічною крутизною

$$S_g = \frac{S}{1 + R_n/R_i}. \quad (7.13)$$

Проаналізуємо цей вираз.

Динамічна крутизна менше статичної (до цього висновку прийшли при розгляді динамічної анодно-сіткової характеристики).

Динамічна крутизна $S_g = S$ при $R_n = 0$, при $R_n = 0$ тріод працює в статичному режимі і крутизна відповідно має значення S . При $R_n = \infty$ $S_g \rightarrow 0$. Це екстремальний випадок. У загальному випадку можна сказати, що зменшення динамічної крутизни в порівнянні зі статичною залежить від відношення навантаження і внутрішнього опору тріода.

2. Динамічний коефіцієнт підсилення K показує, у скільки разів змінна

напруга в анодному ланцюзі $U_{a\sim}$ більше, ніж в ланцюзі сітки $U_{c\sim}$ (тобто це вже параметр підсилювального каскаду):

$$K = \frac{dU_R}{dU_c}.$$

Знайдемо співвідношення динамічного коефіцієнта K і статичного коефіцієнта μ , що його обумовлює.

Зміна напруги на навантаженні при зміні анодного струму $dU_R = -R dI_a$.

Коефіцієнт підсилення запишемо у вигляді:

$$K = \frac{K_n dI_a}{dU_c}; \quad K = R_n S_g.$$

Підставимо S_g з (7.13):

$$K = \frac{R_n S}{1 + R_n / R_i} = \frac{R S R_i}{R_i + R_n},$$

звідси

$$K = \frac{\mu}{1 + R_i / R_n}. \quad (7.14)$$

Проаналізуємо цей вираз.

При $R_n = 0$ $K = 0$. Цей висновок відповідає визначенню динамічного коефіцієнта підсилення. При $R_n \rightarrow \infty$ $K \rightarrow \mu$, тобто в динамічному режимі отримати коефіцієнт підсилення більше значення μ не можна. Числове значення K залежить від співвідношення R_i / R_n та інших факторів схемотехнічного характеру, що розглядаються в спеціальних курсах.

6) Моделі тріода

Для аналізу тріода в складі електронного ланцюга його прийнято моделювати у вигляді генератора струму або генератора напруги.

Підставою для такого моделювання є наступні аналітичні вирази.

1. Зміна анодного струму пов'язана із зміною анодної напруги (7.10).

На лінійній ділянці характеристик з величинами U_c та U_a можуть бути співставленні малі амплітудні значення сигналу:

$$I_{ma} = S U_{mc} + \frac{1}{R_i} U_{ma}. \quad (7.15)$$

Виразу (7.15) відповідає схема ланцюга, зображена на рис. 7.7.

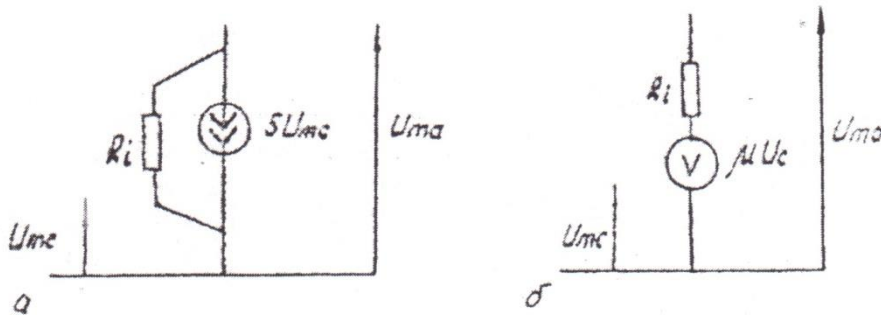


Рис. 7.7. Представлення тріода як генератора струму (а) і генератора напруги (б).

Амплітудне значення струму в ланцюзі анода можна записати виразом

$$I_{ma} = S_g U_{mc}.$$

Замінивши S_g на S відповідно до (7.13) запишемо

$$I_{ma} = \frac{\mu U_c}{R_n + R_i}. \quad (7.16)$$

Виразу (7.16) відповідає схема ланцюга, показана на рис. 7.7, б. Більш повно тріод моделює схема, що враховує міжелектродні ємності (рис. 7.8).

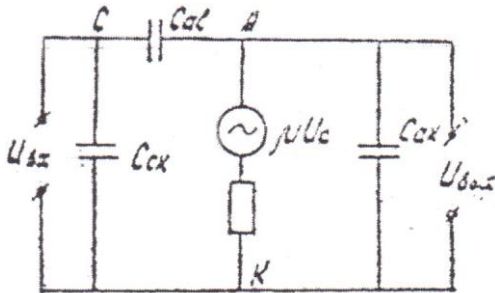


Рис. 7.8. Повна еквівалентна схема тріода.

В реальному тріоді до генератора струму або напруги виявляються підключеними ємності, обумовлені геометрією електродів і виводів. Ці ємності визначають вхідну, вихідну і прохідну провідності в тріоді по змінній напрузі.

Особливо важливо мати мале значення прохідної ємності, оскільки вона є причиною виникнення зворотного зв'язку між вхідним і вихідним ланцюгами тріода і визначає граничну частоту підсилення тріода.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з цоколювкою, паспортними даними і гранично допустимими режимами роботи тріода (за довідником). Записати значення основних параметрів.
2. Ознайомитися з лабораторним макетом для зняття характеристик.
3. Уточнити з керівником роботи режими для зняття характеристик.
4. Зняти і побудувати сімейство статичних анодно-сіткових характеристик при чотирьох значеннях анодної напруги $I_a = f(U_c), U_{a1}, U_{a2}, U_{a3}, U_{a4}$. Одночасно при невеликих позитивних напругах на сітці зняти сітково-анодні характеристики $I_c = f(U_c)$ при $U_a = const$.
5. Зняти і побудувати сімейство статичних анодних характеристик $I_a = f(U_a)$ для чотирьох значень напруги на сітці.
6. За отриманими характеристиками визначити статичні параметри тріода S, Ri, μ .
7. Включити в анодний ланцюг навантажувальний опір, при максимальному значенні $E_a = 200...250B$; зняти динамічні анодно-сіткові характеристики. Опір навантаження взяти рівним 2 та 20 кОм.
8. Побудувати графічно динамічні анодні характеристики, використовуючи дані, отримані в п. 5 для обраних в п. 7 значень R_n .
9. Побудувати графічно анодно-сіткову динамічну характеристику, використовуючи дані п. 8. Порівняти результати, отримані в пп. 7 і 9.
10. Визначити динамічні параметри тріода графічно і розрахунковим шляхом.

Методичні вказівки

При експериментальному дослідженні тріода перш за все слід включити

напругу розжарення. Час розігріву катода в лампах з непрямым розжаренням становить 30...90 с. Потім подати номінальну негативну напруга на сітку. Після цього включити анодну напругу.

При всіх вимірах необхідно стежити, щоб анодний струм не перевищував граничного значення, яке визначається для кожного значення анодної напруги із умови максимально допустимої потужності.

При знятті анодно-сіткових характеристик триода (рис. 7.9) потенціал сітки змінювати від потенціалу запирання (при $I_a = 0$) до значення, відповідного максимально допустимому значенню анодного струму (при даному U_a).

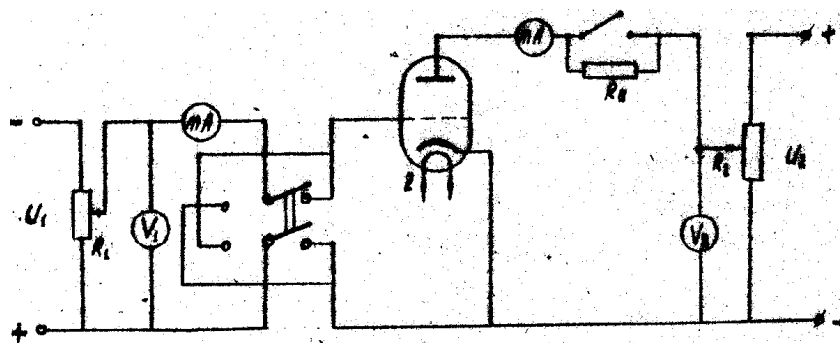
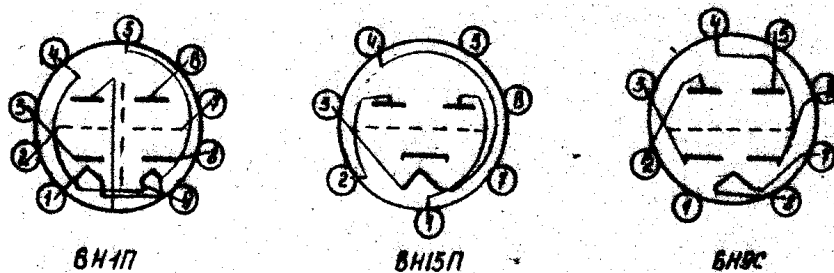


Рис. 7.9. Принципова схема для зняття характеристик триода.

Паспортні дані деяких типів триодів

Електричні параметри	Числові значення			
	6Н1П	6Н15П	6С5С	6С2Н
Анодна напруга, В	250	100	250	110
Анодний струм, мА	8 ± 2	9 ± 3	2,3	8
Крутизна характеристики, мА/В	3,2	5,6	1,6	10
Коефіцієнт підсилення	35 ± 7	38 ± 10	70	64
Допустима потужність, що розсіюється анодом, Вт	2	1,6	1,1	1,2
Найбільша анодна напруга, В	300	300	275	110
Напруга розжарення, В	6,3	6,3	6,3	6,3



Цоколювка триодів

Контрольні запитання

1. Призначення сітки в тріоді.
2. Фізичні процеси керування струмами в тріоді.
3. Що таке діючий потенціал в тріоді?
4. Статичні анодні характеристики.
5. Статичні анодно-сіткові характеристики.
6. Як визначаються статичні параметри по характеристикам – анодним і анодно-сітковим?
7. Що таке динамічний режим роботи тріода?
8. Як побудувати навантажувальну характеристику (пряму)?
9. Як побудувати динамічну анодну характеристику?
10. Як побудувати динамічну анодно-сіткову характеристику?
11. Як визначити динамічні параметри по характеристикам?
12. Які аналітичні вирази пов'язують статичні і динамічні параметри тріода?
13. Моделі тріода.
14. Маркування тріода.

[10;11]

Лабораторна робота № 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕНТОДУ

Мета роботи: вивчити фізичні процеси, що визначають характеристики і параметри лампи з екрануючою сіткою; набути навичок експериментального дослідження п'ятиелектродної лампи в пентодму та тетродом включеннях.

Основні теоретичні відомості. Лампи з екрануючою сіткою (тетрод, пентод)

1) Тетрод.

Тетродом називають приймально-підсилювальну лампу, у якій між керуючою сіткою і анодом розміщена друга сітка, що називається екрануючою.

Призначення екрануючої сітки

Тріод як підсилювальна лампа має два найбільш істотні недоліки: велика прохідна ємність, що обмежує застосування тріодів на високих частотах і порівняно невеликий коефіцієнт підсилення.

Друга сітка поділяє проміжок сітка-анод на дві ділянки. Отже, прохідна ємність перетворюється на дві послідовно включені ємності. Результируюча ємність таким чином зменшується. Для повного поділу ємності сітка повинна являти собою суцільний електростатичний екран. Суцільний екран, природно, на шляху електронів до аноду ставити не можна. Тому другу сітку роблять дуже густою. Екрануюча сітка зменшує прохідну ємність приблизно в 100 разів і в стільки ж послаблює поле анода у катода. Для забезпечення струмопроходження на другу сітку повинен бути поданий досить високій позитивний потенціал $(0,5 \dots 1) U_A$.

Діюча напруга в тетроді.

Фізичний сенс діючої напруги в лампах з сітками такий же, як і в тріоді, – це напруга, яку слід подати на електрод, розташований в площині керуючої сітки, щоб його дія на катодний струм була еквівалентною сумарній дії всіх електродів. Тетрод

умовно замінюють еквівалентним діодом в такій послідовності, як показано на рис. 8.1.

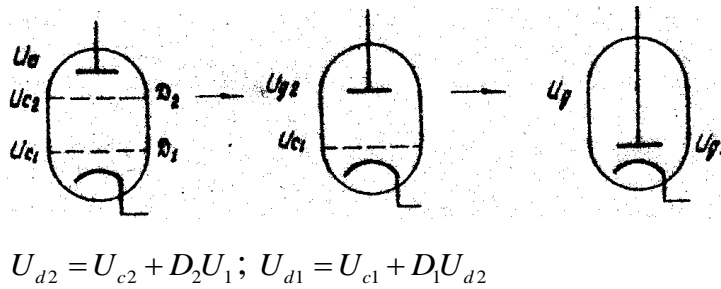


Рис. 8.1. До визначення діючого потенціалу в тетроді.

Загальний вираз для діючої напруги в тетроді має вигляд $U_d = U_{c1} + D_1 U_{c2} + D_1 D_2 U_a$, де D_1 та D_2 – проникність відповідно першої та другої сітки.

Добуток $D_1 D_2 = D$ – загальна проникність лампи – характеризує ступінь послаблення впливу анодної напруги на просторовий заряд у катода. Ця величина значно менше одиниці: $D = 0,01 \dots 0,001$.

Катодний струм в еквівалентному діоді буде дорівнювати струму в реальному тетроді. За допомогою такого прийому отримують вираз для закону «ступінь 3/2» в тетроді. В загальному вигляді цей вираз записується так:

$$I_K = G(U_{c1} + D_1 U_{c2} + D_1 D_2 U_A)^{3/2}. \quad (8.1)$$

Де G визначається геометрією вхідних електродів.

Катодний струм в загальному випадку має три складові:

$$I_K = I_{c1} + I_{c2} + I_A. \quad (8.2)$$

Де I_{c1}, I_{c2}, I_A – відповідно струми першої, другої сітки і анода.

Статичні характеристики тетрода

Багатосіткові лампи, так само як і тріоди, працюють при негативних напругах на сітці, тому струм першої сітки відсутній.

Практичний інтерес представляють залежності струмів анода і екрануючої сітки від відповідних напруг.

Основними для тетрода є характеристики:

анодна $I_A = f(U_A)$ – залежність струму анода від напруги на аноді при постійних значеннях напруг на екрануючій U_{c1} і керуючій U_{c2} сітках;

анодно-сіткова $I_A = f(U_{c1})$ – залежність анодного струму від напруги на керуючій сітці при постійних напругах на аноді та екрануючій сітці.

Розглянемо ці залежності. При невеликих анодних напругах (10...20 В) анодний струм швидко зростає, а струм другої сітки падає (рис. 8.2). Це режим повернення електронів від анода на другу сітку. Сутність його полягає в наступному. На другу сітку подано досить велику позитивну напругу, на аноді (ділянка 1) – значно нижче. Електрони, пролетівши другу сітку, потрапляють в гальмівне поле анода і знову повертаються на другу сітку. Біля поверхні анода створюється динамічна рівновага електронів, швидкість яких дорівнює або близька нулю. Створюється електронна хмара або просторовий заряд, аналогічний електронній хмарі біля поверхні катода (рис. 8.3).

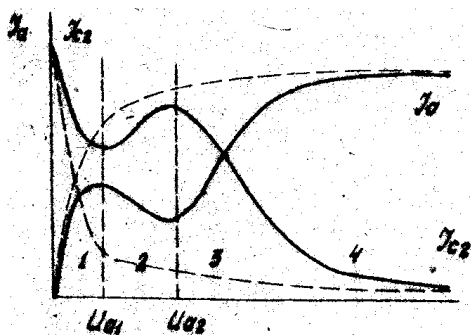


Рис. 8.2. Анодна характеристика тетрода.

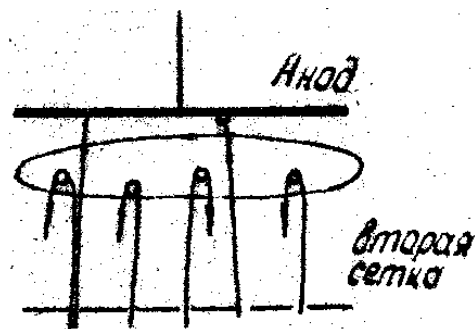


Рис. 8.3. Режим поворотного струморозподілу.

Силкові лінії поля анода замикаються безпосередньо на цьому просторовому заряді. Тому невелике збільшення напруги на аноді (ділянка 1 характеристики) викликає різке збільшення анодного струму.

При підвищенні анодної напруги (ділянка 2) енергія електронів, прискорених потенціалами анода і другої сітки одночасно, стає настільки великою, що електрони, потрапляючи на анод, викликають вторинну емісію, вибивають з анода вторинні електрони, які потрапляють на другу сітку, оскільки її потенціал все ще вище потенціалу анода.

Починаючи з деякого значення напруги, анод знову притягує вторинні електрони (ділянка 3) і при деякому U_A всі вторинні електрони знову повертаються на анод. Характеристика переходить на пологіу ділянку 4. Це робоча ділянка характеристики. У робочому режимі тетрод має великий внутрішній опір. Пологий хід характеристики на робочій ділянці пояснюється сильною екрануючою дією двох сіток (головним чином, другої). У вираз для діючого потенціалу U_d напруга анода входить з двома співмножниками, значно меншими одиниці.

Характер залежності струму другої сітки нескладно пояснити, якщо згадати співвідношення (8.2) для струму в тетроді.

Анодно-сіткові характеристики.

Залежність анодного струму від напруги на керуючій сітці виражається сімейством анодно-сіткових характеристик (рис.8.4). Загальний вид характеристик визначається законом «ступеня 3/2» для тетрода. Фізичні процеси управління струмом в тетроді при зміні напруги на сітці такі ж, як і в тріоді. На характеристиках видно різний вплив на анодний струм напруги на аноді і напруги на екрануючій сітці. Зміна напруги на екрануючій сітці на 20 В зміщує характеристику вліво значно сильніше, ніж зміна напруги на аноді на 40 В.

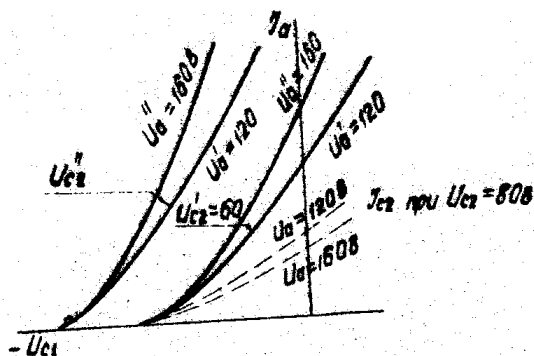


Рис. 8.4. Анодно-сіткові характеристики тетрода.

При зміні напруги на аноді характеристика зміщується вліво, але не паралельно самій собі, як в тріоді. При одному значенні напруги на екрануючій сітці при різних напругах на аноді характеристики йдуть віялоподібно. Початок характеристик практично визначається напругою на екрануючій сітці. Напруга

замикання згідно виразу для діючого потенціалу визначається за формулою $U_{\text{дан}} = D_1 U_{c2} + D_1 D_2 U_A$. Добуток $D_1 D_2$ – набагато менше одиниці.

2) Пентод.

Явище динаatronного ефекту обмежує можливість застосування тетродів з наступних причин:

1. Нестабільність вторинної емісії підвищує внутрішні шуми в лампі.
2. Падаюча ділянка 2 характеристики може бути причиною збудження підсилювача.
3. Спотворення сигналу в динамічному режимі.

Більш досконалою лампою є пентод. В ньому є третя сітка, призначена для усунення динаatronного ефекту. Ця сітка називається захисною. Вона розміщується між другою сіткою і анодом і зазвичай має потенціал катода. (Всередині лампи є електричне з'єднання з катодом).

Механізм придушення динаatronного ефекту за допомогою захисної сітки можна зрозуміти проаналізувавши розподіл потенціалу в просторі катод-анод в пентоді (рис. 8.5).

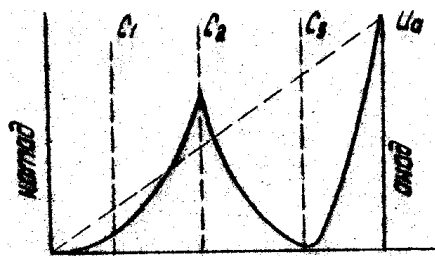


Рис. 8.5. Розподіл потенціалу в пентоді.

У просторі між другою сіткою і анодом створюється потенційний мінімум, який зменшує енергію бомбардування електродами поверхні анода і повертає вторинні електрони знову на анод. Тому анодна характеристика пентода не має провалу, характерного для тетрода. Це дозволяє розширити діапазон можливої зміни вхідного сигналу, оскільки змінюється (розширюється) діапазон зміни робочих напруг на аноді.

Анодна характеристика пентода

Являє собою криву, круто зростаючу на початковій ділянці при малих анодних напругах (режим поворотного струморозподілу) яка переходить на пологі ділянку в робочому режимі. Пояснення характеристики таке ж, як для тетроду на ділянках 1 і 4 (рис. 8.6).

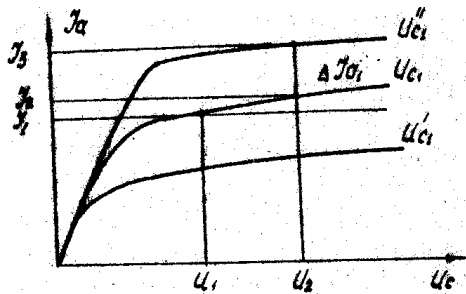


Рис. 8.6. Анодна характеристика пентода.

Анодно-сіткова характеристика пентода

$$I_A = f(U_{C1}) \text{ при } U_A = \text{const}, U_{C2} = \text{const}.$$

Загальний вид залежності пояснюється таким же чином, як і для тріода, тому що визначається тими ж процесами.

Характеристики для різних значень напруг на аноді близькі одна до одної через незначний вплив анодної напруги на анодний струм; вони трохи розходяться за рахунок перерозподілу струмів I_A та I_{C2} .

Така форма характеристик робить їх вельми незручними для визначення статичних параметрів або для розрахунку динамічного режиму.

Основним сімейством характеристик для пентода, що дозволяє робити необхідні розрахунки в статичному і динамічному режимі, є анодні характеристики.

3) Визначення статичних параметрів тетрода і пентода за характеристиками.

Для оцінки властивостей тетродів і пентодів використовується сукупність параметрів, прийнятих для всіх приймально-підсилювальних ламп. Фізичний зміст цих параметрів був розглянутий для тріода. Різниця полягає в числових значеннях і способах визначення параметрів: S, R_i, μ .

Диференціальні параметри визначаються по сімейству анодних характеристик наступним чином (див. рис. 8.6).

1. Крутизна характеристики, мА/В:

$$S = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_{C1}} \text{ при } U_A, U_{C2} = \text{const.} \quad S = \frac{I_3 - I_2}{U_{C1}'' - U_{C1}'}$$

Кількісно крутизна характеристики такого ж порядку, як і в тріода; може бути дещо менше через перерозподіл струмів I_A та I_{C2} .

2. Внутрішній опір, кОм:

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \text{ при } U_{C1}, U_{C2} = \text{const}; \quad R_i = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1}$$

Внутрішній опір пентода значно (на порядок і більше) вище, ніж тріода і становить десятки, сотні кОм.

3. Коефіцієнт підсилення визначається як добуток крутизни і внутрішнього опору: $\mu = SR_i$.

Коефіцієнт підсилення пентода в десятки-сотні разів більше, ніж тріода.

Завдання до виконання роботи.

1. Ознайомитися з будовою, цоколевкою (рис. 8.7.) і паспортними даними досліджуваної лампи за довідником. Записати значення основних параметрів і гранично допустимі режими роботи.

2. Ознайомитися з лабораторним макетом для дослідження пентода і уточнити у керівника роботи режими для зняття характеристик.

3. Зняти і побудувати анодну характеристику пентода в тетродному включенні: $I_{AT} = f(U_A), U_{C1}, U_{C2} = \text{const.}$

Напругу екрануючої сітки взяти рівною 50...75 % номінального значення анодного напруги. Напругу керуючої сітки в інтервалі 1.5...0,5 В.

Одночасно зняти характеристику: $I_{C2} = f(U_A)$ при $U_{C2}, U_{C1} = \text{const.}$

4. Зняти і побудувати сімейство анодних характеристик пентода $I_{An} = f(U_A)$ при $U_{C2}, U_{C1} = \text{const.}$

Напругу на екрануючій сітці поставити номінальною, а на керуючу сітку задати чотири значення напруг.

Одночасно зняти одну характеристику: $I_{c2n} = f(U_A)$ при $U_{c2}, U_{c1} = const$.

5. Зняти і побудувати сімейство анодно-сіткових характеристик пентода: $I_A = f(U_{c1})$ при $U_A, U_{c2} = const$.

Для цього необхідно:

а) на аноді поставити номінальне значення U_{A1} на другій сітці номінальне значення U_{c2} . Напругу на керуючій сітці U_{c1} змінювати від значення, що визначається максимальним струмом анода, до замикання;

б) на аноді залишити напругу U_{A1} , на другій сітці зменшити на 20...25% номінального значення (U_{c2}'). Напругу керуючої сітки змінювати так само, як при виконанні пункту а);

в) напругу зменшити до значення U_{A2} (на стільки, на скільки було зменшено напругу на другій сітці в пункті б)), напругу на другій сітці поставити рівною U_{c2}'' ;

г) напругу на аноді залишити рівним U_{A2} , на сітці поставити значення, рівне U_{c2}' (таке ж, як у пункті б)). Таким чином, слід отримати сімейство з чотирьох анодно-сіткових характеристик.

6. За отриманими анодним характеристикам визначити статичні параметри пентода.

7. Побудувати навантажувальну пряму для значення опору навантаження $R_H = 0,1R_i$ і напруги живлення $E_A = 250B$.

8. Графічно і аналітично визначити динамічні параметри $S_{\partial}, \mu_{\partial}, P_{\partial blx}$.

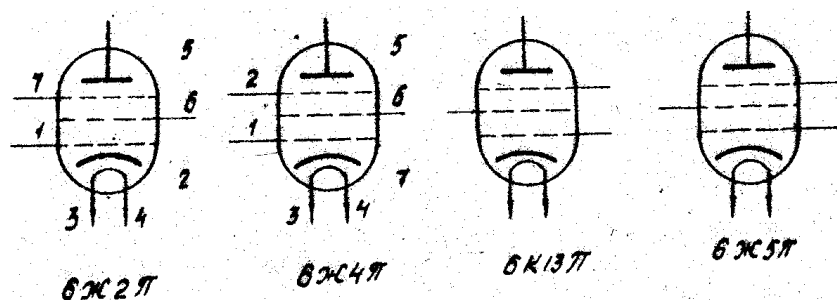


Рис. 8.7. Цоколювання пентодів.

Методичні вказівки

1. При дослідженні пентода (рис. 8.8) та інших ламп з сітками в першу чергу включають напругу розжарення. Час розігріву катода становить 30...90 с. Потім подають негативну напругу на сітку, включають анодну напругу. В останню чергу подають напругу на екрануючу сітку. Зміна послідовності включення анодної напруги і екрануючої сітки може привести до перевищення допустимої потужності в ланцюзі другої сітки і виходу лампи з ладу.

2. При вимірах струмів анода і другої сітки початкову ділянку характеристик слід знімати з малим кроком зміни анодної напруги (4...5 В). На пологих ділянках характеристик анодну напругу доцільно вимірювати через 25...50 В.

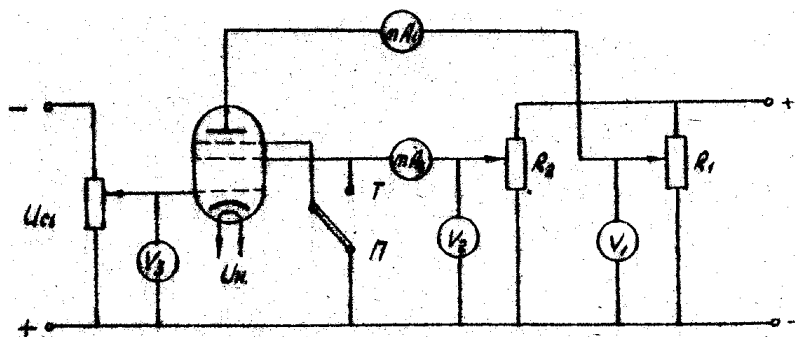


Рис. 8.8. Принципова схема для зняття характеристик пентода.

Паспортні дані деяких типів пентодів

Електричні параметри	Числові значення			
	6K13П	6K2П	6K4П	6K5В
Анодна напруга, В	200	150	250	120
Анодний струм, мА	11,8	42	11	16
Напруга екрануючої сітки, В	120	150	100	120
Струм екрануючої сітки, А	4,4	8	4,2	4
Крутизна характеристики, А/В	4,7	5,5	4,4	10
Допустима потужність в ланцюзі анода, Вт	3,3	1,0	3	2,4
Допустима потужність в ланцюзі екрануючої сітки, Вт	0,7	1,2	0,6	0,8
Напруга розжарення, В	6,3	6,3	6,3	6,3

Контрольні запитання

1. Призначення екрануючої сітки.
2. Призначення захисної сітки в пентоді.
3. Як визначається діючий потенціал в пентоді?
4. Що таке динаatronний ефект, як він проявляється в тетроді, як усувається в пентоді?
5. Анодна характеристика тетрода.
6. Анодна характеристика пентода.
7. Анодно-сіткова характеристика пентода і тетрода.
8. Дати визначення основних параметрів пентода.
9. Як визначаються за характеристиками статичні параметри?
10. Які існують аналітичні співвідношення між основними параметрами в лампі?
[10 – 13].

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСЦИЛОГРАФІЧНОЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТРУБКИ

Мета роботи: поглибити знання, отримані при вивченні курсу; набути навичок практичного застосування осцилографічних ЕПТ, експериментального дослідження характеристик, інженерного аналізу результатів дослідження.

Основні теоретичні відомості

Осцилографічні електронно-променеві трубки (ЕПТ) призначені для візуального дослідження швидких змін у часі струмів і напруг, для осцилографування струмів і напруг. У них електричний сигнал перетворюється в світлове зображення на екрані за допомогою тонко сфокусованого електронного променя.

Існує велика кількість конструктивних різновидів ЕПТ, призначених для досягнення певних технічних параметрів, проте всі конструкції ЕПТ обов'язково містять такі елементи: джерело електронів – підігрівний катод; керуючий електрод або модулятор; систему електродів, призначених для формування електронного потоку в тонкий промінь – фокусуючу систему; систему керування електронним променем – відхиляючу систему: екран, покритий люмінофором – речовиною, здатною світитися при бомбардуванні її електронами.

Призначення електродів і принцип дії ЕПТ

Схематичну будову ЕПТ показано на рис. 9 .1.

Оксидний підігрівний катод К – джерело електронів. Емітуючою є торцева поверхня катода, звернена до екрану ЕПТ.

Катод розміщений усередині циліндра М, який називається керуючим електродом, або модулятором. На модулятор подається невеликий негативний потенціал. При зміні потенціалу модулятора змінюється кількість електронів, здатних подолати потенційний мінімум біля катода. Таким чином, змінюється струм катода. Далі розташовані перший анод A_1 у вигляді циліндра з двома або трьома

діафрагмами і другий анод A_2 також циліндричної форми. На аноди подаються позитивні потенціали, що забезпечують прискорення електронів в напрямку до екрану. Потенціал першого анода складає сотні, другого – кілька тисяч вольт.

Систему електродів, що включає в себе катод, модулятор, перший і другий аноди, називають електронним прожектором. Електронний прожектор формує електронний потік у вузький пучок – електронний промінь.

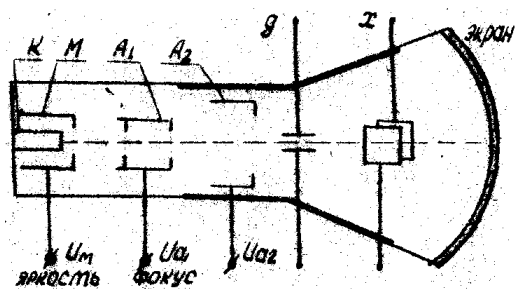


Рис. 9.1. Основні елементи будови катода.

Після виходу з електронного прожектора електронний промінь потрапляє в відхильну систему, що складається з двох пар пластин. Одна пара пластин X забезпечує відхилення променя по горизонталі, інша Y – по вертикалі.

Пройшовши відхиляючу систему, електронний промінь потрапляє на екран – дно трубки, покрите люмінофором, речовиною, здатною світитися при бомбардуванні електронами. Світіння люмінофора спостерігається ззовні через скло балона трубки.

Фокусуюча система ЕПТ

Між керуючим електродів і першим анодом і між першим і другим анодами створюються електричні поля складної форми. На рис. 9.2. зображена картина електростатичного поля у вигляді еквіпотенціальних поверхонь.

Це поле діє як електронно-оптична система, що складається з двох лінз – збиральної і розсіювальної із загальним переважанням збірної дії. Траєкторія електрона завжди направлена вздовж силової лінії електричного поля, тобто перпендикулярно до еквіпотенціальної поверхні. На першій ділянці, де еквіпотенціальні лінії звернені опуклістю до катода, траєкторії електронів

переломлюються до вісі, тобто електронний потік фокусується. На другій ділянці, де еквіпотенціальні поверхні звернені до катода своєї увігнутістю, пучок расфокусується. Однак збірна дія переважає розсіювальну. Це пояснюється наступними причинами: по-перше, завдяки спеціальній формі електродів (лівий електрод має більш вузький отвір в діафрагмі, правий – більш широке) викривлення еквіпотенціалей електростатичного поля на першій збираючій ділянці більше, ніж на другій – розсіювальній; по-друге, швидкість електронів зростає при русі від катода до екрану (потенціал другого анода значно вище потенціалу першого). Тому розсіювальну ділянку електрони проходять швидше, ніж збираючи, їх траєкторії змінюються менше.

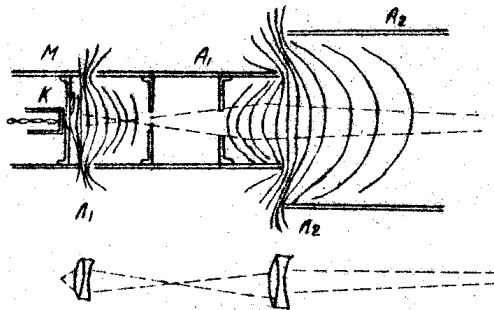


Рис. 9.2. Фокусуючи система ЕПТ.

Перша лінза, що знаходиться між керуючим електродом і першим анодом, є короткофокусною. Під її дією траєкторії електронів утворюють пучок, що сходиться всередині першого анода.

Друга лінза, що знаходиться між першим і другим анодами, має набагато більшу фокусну відстань, ніж перша, і проектує область схрещення на екран ЕПТ. Електронний промінь, сфокусований на екран, зображується у вигляді яскравої невеликої за розмірами плями.

У нижній частині рис. 9.2 показана оптична аналогія даної електронно-оптичної системи.

Вочевидь, при зміні потенціалів електродів, що створюють електронно-оптичну систему, буде змінюватися картина поля, переміщатися точка схрещення електронних траєкторій, змінюватися фокусування електронного плями на екрані.

Фокусну відстань лінз з метою фокусування електронного пучка в площині екрану можна змінювати за рахунок зміни потенціалу як першого, так і другого анодів.

Доцільно регулювати при фокусуванні потенціал першого анода (як більш низький за величиною), впливаючи одночасно на обидві лінзи.

При зміні потенціалу одного з анодів для збереження фокусування слід змінювати потенціал другого анода. Оптимальна фокуруюча напруга першого анода зазвичай становить $\frac{1}{4} \dots \frac{1}{8}$ напруги другого анода. Для даної трубки відношення напруг U_{A1} та U_{A2} , які забезпечують оптимальне фокусування, не залежить від цих напруг, що є наслідком теореми подібності полів.

Розмір плями на екрані в значній мірі визначається ступенем симетричності фокуруючої системи.

Розміри плями на екрані залежать не тільки від фокууючої дії електронного прожектора, а й від взаємодії електронів у пучку. Як однойменні електричні заряди, електрони відштовхуються один від одного, що викликає розфокусування. При збільшенні густини струму в електронному пучку сили розштовхування збільшуються і фокусування погіршується. Збільшення швидкості електронів пучка досягається підвищенням анодної напруги. При цьому зменшується розсіювання електронів. Тому для кращого фокусування доцільно працювати при меншій щільності струму в пучку і при підвищеній напрузі на другому аноді.

Яскравість плями на екрані

Яскравість плями залежить від зміни негативної напруги на модуляторі. При цьому змінюється кількість електронів, що йдуть від катода в напрямку до екрану, тобто змінюється струм катода. Механізм залежності струму катода в трубці від зміни напруги керуючого електрода аналогічний механізму залежності струму в лампах з сітками від зміни напруги керуючої сітки. Залежність струму променя від напруги на модуляторі називається модуляційною характеристикою.

Яскравість світіння люмінофора B , що піддається електронному бомбардуванню, за законом Ленарда пропорційна числу електронів, що потрапляють на 1 см^2 поверхні за 1 с , і прискорювальній напрузі U , що діє між екраном і катодом:

$$B = An(U - U_0)^m,$$

де A, m – постійні, що характеризують люмінофор; U_0 – потенціал, при якому починає світитися люмінофор; визначається складом люмінофора.

Помножуючи обидві частини формули на площу плями, що бомбардується електронами, отримуємо в лівій частині силу світла, яку віддає пляма, що світиться, а в правій – добуток n на площу плями, рівний струму променя I_A : $I_\phi = AI_A(U - U_0)^m$.

Таким чином, сила світла I_ϕ залежить від струму променя, прискорювальної напруги і від параметрів екрана. В силу цієї залежності модуляційна характеристика називається ще яскравісною.

На рис. 9.3 показана залежність струму пучка і яскравості світіння плями від напруги на модуляторі. При збільшенні негативної напруги модулятора струм променя і яскравість світіння плями на екрані зменшуються.

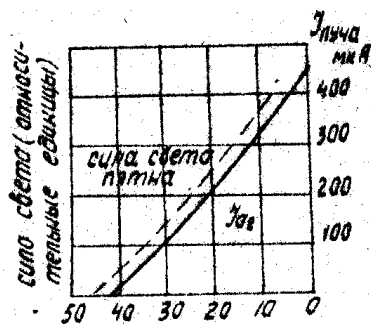


Рис.9.3. Модуляційна характеристика.

Напруга, при якій пляма на екрані зникає, називається запірною напругою. Напруга запирання залежить від конструкції електродів прожектора і від напруги на другому аноді.

Важливий параметр трубки, що визначає можливості її застосування, – час післясвітіння екрана. Збуджений люмінофор випромінює світло ще деякий час після

того, як припиниться електронне бомбардування. Післясвітіння спостерігається у всіх люмінофорів, але в різному ступені.

Часом післясвітіння зазвичай називають час, за який яскравість світіння спадає до 1% початкового значення. Люмінофори за часом післясвітіння діляться на дві групи:

дуже короткий (менше 10 мкс);

коротке (10 мкс ... 0,01 с);

середнє (0,01 ... 0,1 с);

тривале (0,1 ... 16 с);

дуже тривале (більше 16 с);

В трубках, на екранах яких зображення змінюється безперервно (наприклад, в телевізійних трубках), післясвітіння екрану має бути мінімальним.

При реєстрації швидкоплинних процесів екрани ЕПТ повинні бути з великим післясвітінням, щоб можна було спостерігати зображення, коли причина, що викликає його, вже зникла.

Час післясвітіння, колір і яскравість світіння екрана визначаються складом люмінофора.

Потенціал екрану

Електрони пучка, потрапляючи на екран, вибивають вторинні електрони. При деякому значенні прискорювальної напруги на другому аноді коефіцієнт вторинної емісії стає рівним одиниці. Вторинні електрони потрапляють на внутрішню поверхню скляної колби. Щоб забезпечити стікання вторинних електронів, на цю поверхню наносять провідний шар аквадагу (колоїдний розчин графіту) або будь-якого металу, який з'єднують з другим анодом. В деяких трубках від цього шару роблять виводи крізь скло назовні і використовують їх як окремі прискорювальні аноди.

З боку променя екран покривають тонким шаром алюмінію, прозорим для електронів (рис. 9.4). Цей шар має контакт з аквадаговим покриттям, слугує для

стабілізації потенціалу екрану і підвищення яскравості світіння. Збільшення світлової віддачі відбувається за рахунок відбиття світла алюмінієвою плівкою.

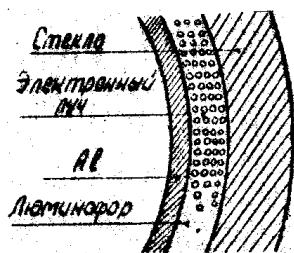


Рис. 9.4. Конструкція екрана осцилографічної ЕПТ.

При зміні яскравості з допомогою напруги модулятора буде змінюватися конфігурація поля першої лінзи і, отже, фокусування пучка. Для відновлення фокусування потрібно змінити відповідно напругу на анодах. Отже, фокусування і яскравість виявляються взаємно пов'язаними. Для усунення цього небажаного ефекту між модулятором і анодом розміщують додатковий електрод у вигляді диска або циліндра з діафрагмами. На нього подають позитивний потенціал і називають зазвичай пришвидшувачим електродом. В цьому випадку фокусуюча дія основних лінз, що створюється між пришвидшувачим електродом і першим входом і між першим і другим анодами, практично не залежатиме від напруги на модуляторі. На прискорювальний електрод подається така ж напруга, як і на другий анод. У цій конструкції електрони не потрапляють на перший анод, струм першого анода дорівнює нулю. Завдяки цьому регулювання яскравості практично не залежить від регулювання фокусування, тому що тут відсутня зміна напруги на першому аноді за рахунок зміни падіння напруги на дільнику.

Відхиляюча система (чутливість осцилографічної ЕПТ)

При відсутності напруги на відхиляючих пластинах електронний промінь сфокусований в центр екрану і світла пляма знаходиться в центрі екрану. Якщо на одній з пластин буде більш високий потенціал, то електронний промінь відхилиться в сторону цієї пластини і пляма на екрані відповідно зміститься.

Відношення переміщення плями на екрані до відхиляючої напруги – основний параметр, який називається чутливістю трубки. Для визначення чутливості

вимірюється переміщення h плями на екрані, що викликається відхиляючою напругою $U_{\text{откл}}$: $b = \frac{h}{U_{\text{откл}}}$ де b – чутливість трубки, мм/В. Розрахунок показує, що чутливість залежить від геометрії відхиляючої системи і від напруги на другому аноді U_{A2} :

$$b = \frac{l_1 \cdot l_2}{2U_{A2} \cdot d},$$

де l_1 – довжина відхиляючої пластини; l_2 – відстань від відхиляючої пластини до екрану; d – відстань між пластинами.

З формули видно, що для підвищення чутливості трубки слід збільшувати довжину відхиляючих пластин та їх відстань до екрану, зменшувати U_{A2} , тим самим збільшувати час взаємодії електронного пучка і відхиляючого поля і зменшувати відстань між пластинами d (рис. 9.5). Збільшення розмірів пластин обмежене можливим кутом відхилення пучка, при якому промінь потрапляє на пластини. Збільшення l_2 і зменшення U_{A2} пов'язані зі збільшенням розсіювання електронів, тобто погіршенням різкості світлової плями.

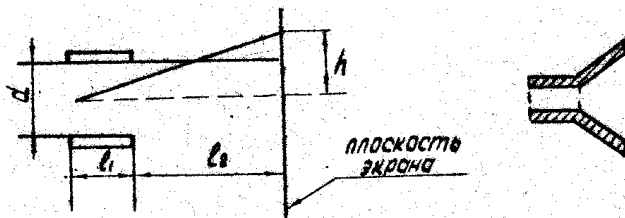


Рис.9.5. До визначення чутливості трубки

Сучасні конструкції мають більш складну форму відхиляючих пластин (див. рис. 9.5), і прискорення електронів, необхідне для отримання потрібної яскравості, досягається за рахунок так званого післяприскорення.

У трубках з післяприскоренням є додатковий анод (або кілька анодів), який у вигляді покриття з аквадагу наносять на конусну частину трубки ближче до екрану. У цьому випадку електрони пучка, прискорені спочатку відносно невеликою напругою другого анода ($U_{A2} = 1 \dots 2 \text{ кВ}$), відхиляються при високій чутливості, а потім у відхиленому пучку прискорюються додатково полем третього і наступних анодів,

що мають більш високі потенціали ($U_{A3} \approx U_{A2}$ і т. д.). Такий спосіб дозволяє отримати велику яскравість світіння, в той же час не знижуючи чутливість трубки.

Отримання осцилограми

Для аналізу форми кривої напруги її прикладають до однієї пари пластин (Y). До іншої пари пластин (X) підключають напругу U_x пилоподібної форми, яка називається напругою розгортки (рис. 9.6). При лінійному збільшенні цієї напруги (ділянка OA) світла пляма переміщується по екрану пропорційно часу. Оскільки люмінофор світиться деякий час після відходу променя з даної точки екрана, спостерігається суцільна горизонтальна лінія. При різкому зменшенні напруги (ділянка AB) промінь майже миттєво переміщається в початковий стан.

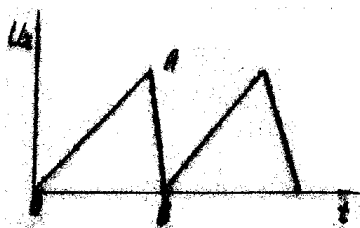


Рис. 9.6. Форма напруги на горизонтальних відхиляючих пластинах.

Коли на іншу пару пластин подано досліджувану напругу, траєкторія плями на екрані буде визначатися законом зміни цієї напруги в часі. Електронний промінь буде прокреслювати осцилограму.

Підбираючи період пилоподібної напруги (період розгортки), в ціле число разів більший періоду досліджуваного сигналу, отримують накладення одне на одне окремих повторюваних зображень, стійке зображення зміни сигналу в часі.

Опис експериментальної установки

Спрощена схема дослідження ЕПТ з електростатичним керуванням зображена на рис.9.7, схема лабораторного макета – на рис. 9.8.

До складу лабораторного макета входять: осцилограф С1 з осцилографічною трубкою; вимірювальний блок; вольтметри; універсальне джерело живлення УП-2; розділовий трансформатор; ЛАТР.

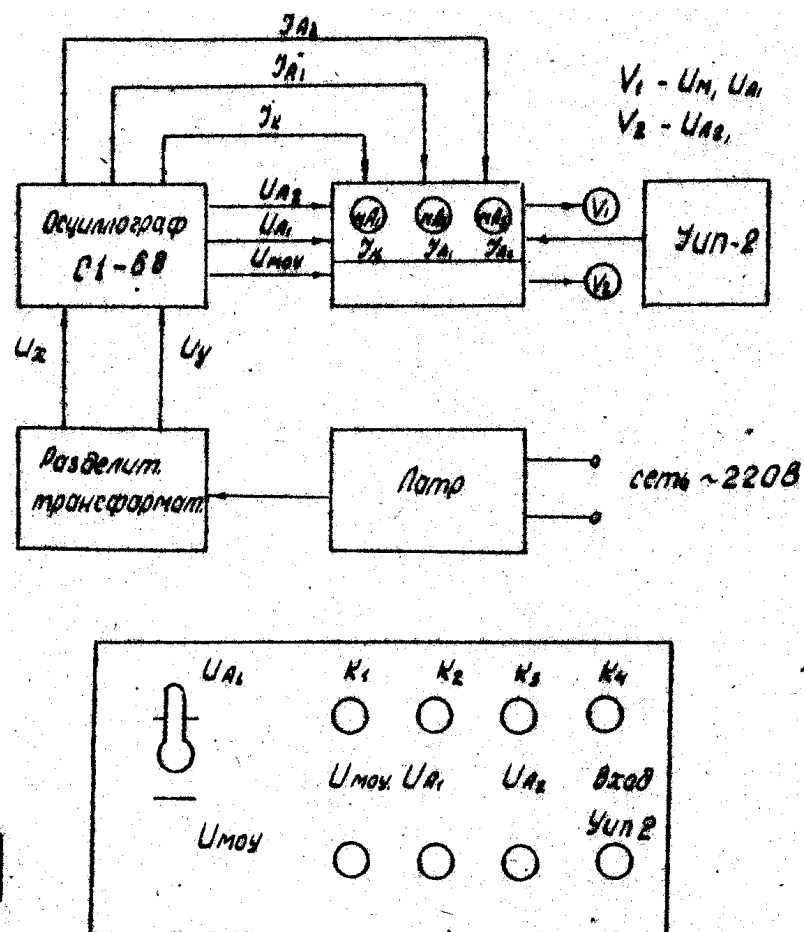
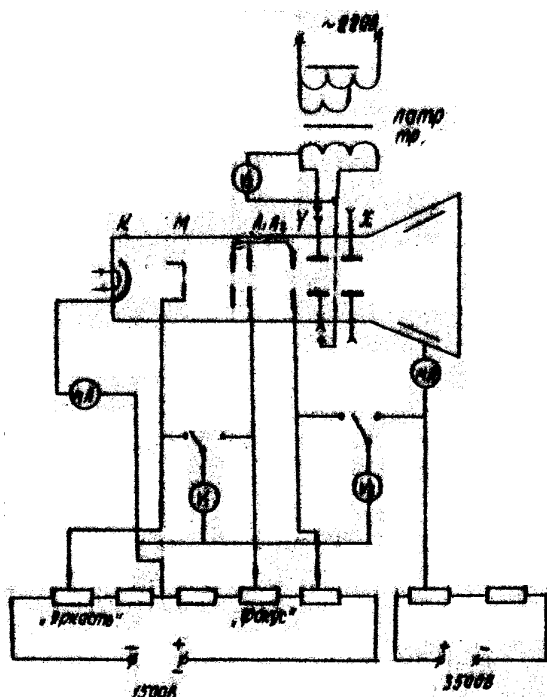


Рис. 9.7. Спрощена схема дослідження ЕПТ з електростатичним керуванням

Живлення електродів ЕПТ здійснюється від джерел, наявних в осцилографі. Виводи електродів зроблені на гнізда K_1 , K_3 , розташовані на бічній стінці вимірювального блоку. До цих виводів підключають вимірювальні прилади для вимірювання потенціалів модулятора U_M , першого U_{A1} та другого U_{A2} анодів. Для вимірювання напруги першого анода і напруги модулятора використовується ламповий вольтметр, що підключається до гнізд K_1 . Відповідне перемикання виконують за допомогою тумблера T_1 .

Струми катода, першого і третього анодів вимірюють мікроамперметром, розташованими на передній панелі вимірювального блоку.

Напругу на другому аноді вимірюють вольтметром, що підключається в гніздо K_3 . Величину U_{A2} регулюють зміною додаткової напруги, створюваною від УИП-2, який включається в гніздо K_4 .

Вимірювальний сигнал на пластинах X і Y подається від ЛАТРа через розділовий трансформатор, де є тумблер для відповідного перемикання сигналу.

Напругу на модуляторі регулюють ручкою «Яскравість» на передній панелі осцилографа. Напругу на першому аноді регулюють ручкою «Фокус».

Завдання з виконання роботи

1. Ознайомитися з експериментальним макетом, включити його.

Примітка. В експериментальному макеті використовуються напруги понад 1000 В. Необхідно суворо дотримуватися правил техніки безпеки.

2. Регулюючи напруги на першому аноді і модуляторі, отримати на екрані яскраву, добре сфокусовану пляму. Записати показання всіх приладів, вважати цей режим номінальним.

3. Зняти залежність струму променя від напруги на модуляторі: $I_A = f(U_M), U_{A2} = const$ – модуляційні характеристики. Зафіксувати напругу запирання при напрузі на другому аноді $U_{A2} = 1475$ и 1500 В.

4. Дослідити взаємозв'язок напруг першого та другого анодів при умові оптимального фокусування променя. Напругу другого аноду вимірювати за допомогою УИП-2 через 20...25 В у діапазоні 1400... 1500 В.

5. Дослідити залежність відхилення променя на екрані від відхиляючої напруги на пластинах X і Y. Напругу на пластинах регулювати за допомогою ЛАТРа від нуля через 1 ... 2 В в межах, коли зображення на екрані є зручним для спостереження (займає не більше 3/4 розміру екрану).

6. За даними п. 5 розрахувати і побудувати залежність чутливості від відхиляючої напруги для X та Y пластин.

Зміст звіту

Звіт повинен містити: спрощену схему випробувань ЕПТ; результати дослідження пп. 2 – 6 у вигляді таблиць і графіків; висновки по роботі – повне пояснення результатів дослідження, отриманих при виконанні пп. 2 – 6.

Питання для самоперевірки

1. Призначення основних елементів осцилографічної ЕПТ.
2. Що таке електронна лінза?
3. Будова електронного прожектора.
4. Від чого залежить яскравість зображення на екрані?
5. Модуляційна характеристика ЕПТ.
6. Що таке чутливість осцилографічної ЕПТ?
7. Як пов'язана чутливість з конструкцією ЕПТ?
8. Як залежить чутливість від напруги на другому аноді?
9. Призначення третього анода.
10. Від чого залежить гранична частота сигналу, який може спостерігатися на екрані ЕПТ?
11. Як отримують осцилограми на екрані ЕПТ?

[10; 14]

Лабораторна робота № 10

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПРИЛАДИ

Мета роботи: Дослідження вольт-амперних і світлових характеристик вакуумного і газонаповненого фотоелементів для видимого спектру світла.

Короткі теоретичні відомості про фотоелектричні прилади

Електричні прилади, в яких керування струмом здійснюється за допомогою світла, називаються фотоелектричними приладами. До них відносяться: іонні та електронні фотоелементи, фотоелектронні помножувачі, фоторезистори, фотогальванічні елементи, фотодіоди, фототранзистори.

Фотоелементи застосовуються у найрізноманітніших областях науки і техніки. У техніці зв'язку фотоелементи використовуються в установках для передачі зображень (фототелеграфія), для телебачення, в різних приладах для сигналізації та зв'язку на невидимих (інфрачервоних) променях. Крім пристроїв зв'язку, фотоелементи застосовуються в звуковому кіно, в промисловості в якості реле для управління автоматичними верстатами, в астрономії як фотометри для вимірювання яскравості зірок і т.д.

В електронних та іонних фотоелементах знаходить практичне застосування зовнішній фотоэффект – виникнення емісії електронів при опроміненні поверхні металу або напівпровідника світлом. Встановлена в 1888 р. А. Г. Столетовим пропорційність струму фотоелектронної емісії величині світлового потоку складає основу дії цих фотоелементів.

В фотоелектронних помножувачах також використовується фотоэффект, але отримані фотони множаться за рахунок вторинної емісії.

В фоторезисторах знаходить застосування внутрішній фотоэффект – виникнення нерівноважних електронно-діркових пар в напівпровіднику під дією світла, яке обумовлює сильну залежність електричного опору напівпровідника від інтенсивності падаючого на нього світла.

В фотогальванічних елементах, фотодіодах і фоторезисторах

використовується фотогальванічний ефект – виникнення електрорушійної сили в р-п-переході в результаті поділу полем переходу електронно-діркових пар, що утворюються під дією світла. Фотогальванічні елементи самі є джерелами електрорушійної сили і можуть працювати без джерел живлення. Зазначену властивість мають також фотоелементи, в яких використовується фотомагнітоелектричний ефект, відкритий в 1934 р. М.М. Носковим. В цих приладах електронно-діркові пари, що утворюються під дією світла дифундують від поверхні вглиб напівпровідника, де розділяються поперечним магнітним полем, що і обумовлює появу фотоелектрорушійної сили.

Фотоелектричні прилади знаходять широке і різноманітне застосування в науці і техніці як елементів, керовані світлом. Фотогальванічні елементи, що мають високе ККД, дозволяють здійснювати пряме перетворення сонячного світла в електрику, чим забезпечують використання невичерпного джерела енергії для космічних кораблів і супутників.

Електронновакуумні фотоелементи

Будова електронного фотоелемента показана на рис. 10.1. У скляному балоні у вакуумі розміщені два електроди – катод і анод. В якості анода зазвичай використовується невелике металеве кільце розташоване в центрі балона. Катодом є тонкий світлочутливий шар, нанесений на внутрішню поверхню балона.

Для виготовлення катодів електровакуумних фотоелементів використовують світлоактивні метали. Найбільш чутливими щодо фотоелектричної емісії є лужні і лужноземельні метали, які мають найменшу в порівнянні з іншими металами роботу виходу, з них найбільше застосування отримав цезій.

Схема включення фотоелемента показана на рис. 10.2. У ланцюзі анода знаходяться джерело постійної напруги $E_a = (150 \div 200)$ В і навантаження R . При освітленні фотоелемента його катод починає емітувати електрони і в анодному ланцюзі виникає струм, величина якого пропорційна інтенсивності світлового потоку Φ :

$$I_a = K_\Sigma \Phi. \quad (10.1)$$

При зміні величини світлового потоку пропорційно змінюється анодний струм і величина вихідної напруги

$$U_R = RI_a = K_\Sigma R \Phi. \quad (10.2)$$

Таким чином, в фотоелементі здійснюється керування вихідною напругою за допомогою світла.

Величина

$$K_\Sigma = \frac{I_a}{\Phi}, \text{ [мкА/Лм]} \quad (10.3)$$

називається інтегральною чутливістю або інтегральною віддачею фотоелемента. Вона показує величину анодного струму в мікроамперах, що викликається світловим потоком в один люмен, отриманим від джерела світла певного типу.

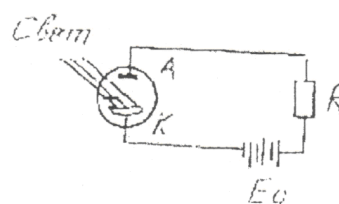
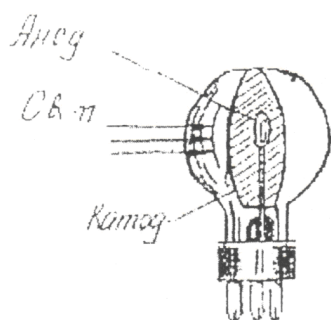


Рис. 10.1. Будова електронного фотоелементу. Рис. 10.2. Схема включення фотоелементу.

Для підвищення інтегральної чутливості фотоелемента його катод повинен виготовлятися з матеріалів, в яких ефективність передачі енергії квантів світла електронам досить висока, а робота виходу електронів мінімальна. Чисті метали мають низьку чутливість. Крім того, червона межа фотоефекту всіх металів, крім лужних лежить в ультрафіолетовій чи крайній фіолетовій частини спектра. Тому в сучасних фотоелементах найбільше застосування отримали напівпровідникові фотокатоди, наприклад, киснево-цезієвий чи киснево-срібно-цезієвий. Будова цього катода показана на рис. 10.3.

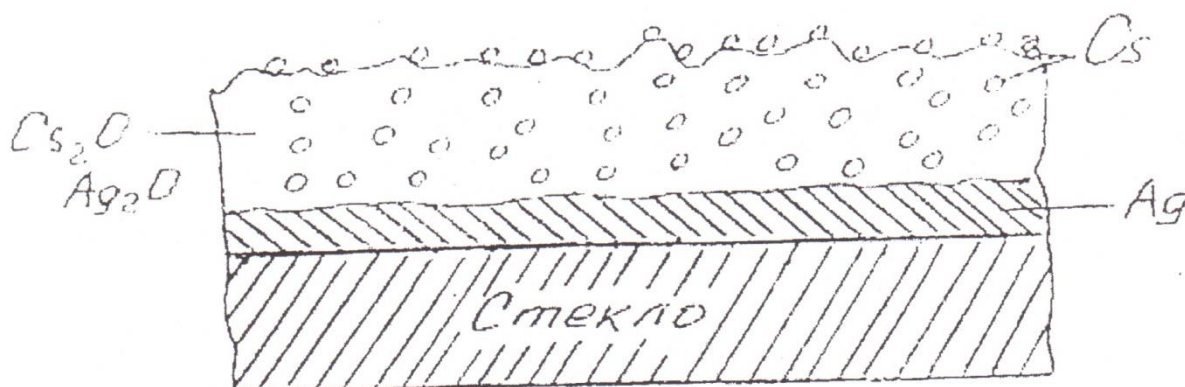


Рис. 10.3. Будова кисневоцезієвого катода.

На одну половину внутрішньої поверхні балона наносять шар срібла і окислюють його. Потім всередину балона поступово, в невеликих кількостях вводять пари цезію, які осідають на шарі срібла, при цьому цезій частково окислюється, відновлюючи срібло. В результаті виходить катод складної структури, в якому на шарі срібла, званому «підкладкою», знаходиться шар окису цезію, в який вкраплені частки чистого цезію та срібла. При подальшому прогріванні фотоелемента до температури $170 - 190^{\circ}\text{C}$ на поверхні окису цезію утворюється мономолекулярний шар адсорбованих атомів цезію. При освітленні такого катода світлом довгохвильової частини спектра електрони емітуються мономолекулярною плівкою цезію; при світлових променях з малою довжиною хвилі в емісії електронів беруть участь також частки цезію та срібла, вкраплені в шарі окису цезію.

В сурм'яно-цезієвих фотоелементах для виготовлення катода спочатку отримують на склі балона або металевої підкладці шар сурми (шляхом випаровування її у вакуумі), на який потім осідають пари цезію. В результаті хімічної реакції утворюється з'єднання сурми і цезію (SbCs_3), всередині і на поверхні якого є адсорбовані атоми чистого цезію. Це з'єднання за своїми властивостями є напівпровідником, прозорим для світла з довжиною хвилі більше 6000 \AA і мають дуже велике електричний опір. Сурм'яно-цезієві фотоелементи виготовляють двох типів: 1) катод отримують безпосередньо на склі балона, 2) катод розташовується на металевій (зазвичай нікелевій) платівці.

Чутливість вакуумних киснево-цезієвих фотоелементів дорівнює 20 - 30 мкА/лм, доходячи в деяких зразках до 50 – 60 мкА/лм. Чутливість сурм'яно-цезієвих фотоелементів дорівнює 60 – 90 мкА/лм.

Чутливість (інтегральна віддача) фотоелемента визначає результат впливу на фотокатод усього світлового потоку, що містить в собі світлові коливання різних частот, в загальному випадку від ультрафіолетових променів до інфрачервоних. Але розподіл енергії по спектру для використовуваних в техніці освітлювачів (лампи розжарювання, дуга) нерівномірний; зазвичай на більш коротких хвилях (видиме світло) випромінювання енергії значно менше, ніж на довгих (інфрачервоні промені), що видно, наприклад, на рис. 10.4, де крива 1 показує розподіл енергії в потоці, який формує електрична лампа розжарювання з вольфрамовим катодом при $T = 2850^{\circ}\text{K}$. Тому, крім величини повної чутливості (інтегральної віддачі), дуже важливою характеристикою фотоелемента є його спектральна характеристика, що показує величину чутливості фотоелемента до світлових коливання різних довжин хвиль або, інакше, розподіл його чутливості по спектру частот (рис. 10.4).

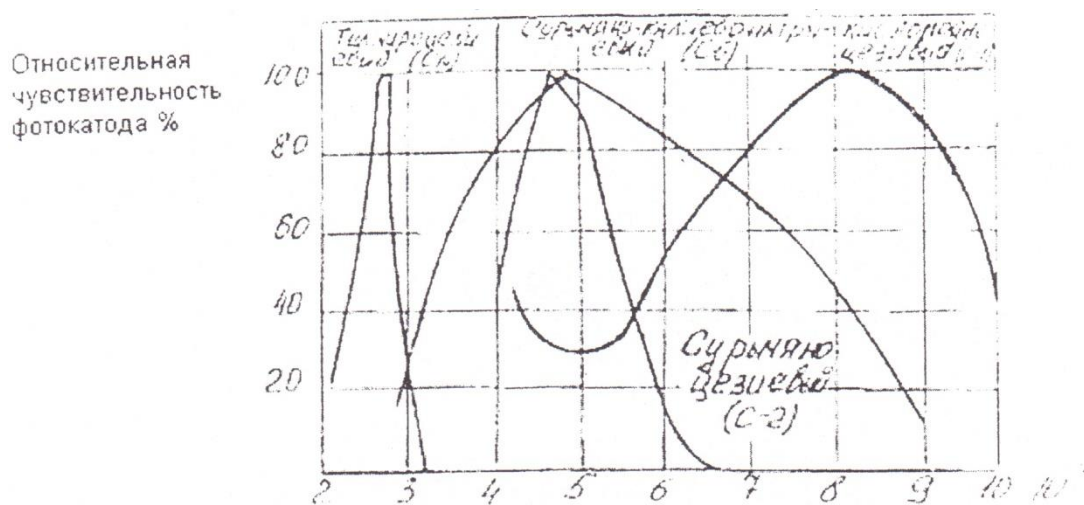


Рис. 10.4. Спектральна характеристика фотокатодів

$$K_{\lambda} = \frac{I_a}{\Phi_{\lambda}}. \quad (10.4)$$

Різна чутливість фотоелемента до променів різної довжини хвилі обумовлюється тим, що поверхневий шар речовини, що емітує під дією світла електрони, з різною інтенсивністю поглинає енергію коливань різних частот. При адсорбції атомів металу на поверхні іншої речовини змінюється смуга частот

коливань, що викликають більш інтенсивний фотоэффект, тобто максимум чутливості фотоелемента буде зміщуватися в область більш довгих або більш коротких хвиль в залежності від властивостей адсорбуючої поверхні. На рис. 10.4 показані спектральні характеристики сурм'яно-цезієвого (крива 2) і киснево-цезієвого (крива 3) фотоелемента. З цих характеристик видно, що сурм'яно-цезієвий фотоелемент має найбільшу чутливість при $\lambda = 4500 - 5000 \text{ \AA}$ (в області блакитних та зелених променів) і дуже малу в червоних променях; киснево-цезієвий фотоелемент має два максимуми: один в ультрафіолетових променях, другий в області червоних променів ($\lambda = 7000 - 8000 \text{ \AA}$) і іноді навіть в інфрачервоних променях.

Отже, в тих установках і пристроях, де на фотоелемент впливає потік видимих променів (телефотографія, звукове кіно і т. п.), вигідніше використовувати сурм'яно-цезієвий фотоелементи, тим більше, що, як видно з кривої 1 рис. 10.4, енергія випромінювача на хвилях видимого світла є малою. Киснево-цезієвого фотоелемент має переваги в тих випадках, коли потік, що впливає на фотоелемент є довгохвильовим, наприклад інфрачервоним (в сигналізаційних пристроях).

Оскільки виходить, що фотокатоди істотно розрізняються за спектральною чутливістю, з цим необхідно рахуватися при виборі фотоелемента для тих чи інших цілей.

Для цього, щоб правильно вибрати робочий режим фотоелемента, необхідно знати його анодні характеристики $I_a = f(U_a)$. Ці характеристики показані на рис. 10.5.

При збільшенні анодної напруги фотострум спочатку швидко зростає, а потім досягає насичення. Величина струму насичення визначається емісією фотокатода і тому вона тим більше, чим більше світловий потік Φ .

У фотоелементах з сурм'яно-цезієвим катодом, нанесеним на скло, спостерігається при великих світлових потоках аномальне збільшення анодного струму також в режимі насичення (пунктирна крива на рис. 10.5). Це явище обумовлено великим електричним опором фоточутливого шару катода. Проходячи через шар, струм емісії створює між віддаленими точками катода значну різницю

потенціалів, в результаті частина емітованих катодом електронів спрямовується не на анод, а до ділянок катода, які мають високий позитивний потенціал і вибиває звідти вторинні електрони, що і призводить до додаткового зростання анодного струму.

Залежність струму фотоелемента від величини світлового потоку $I_a = f(\Phi)$ при $U_a = const$ називається світловою характеристикою (рис. 10.6).

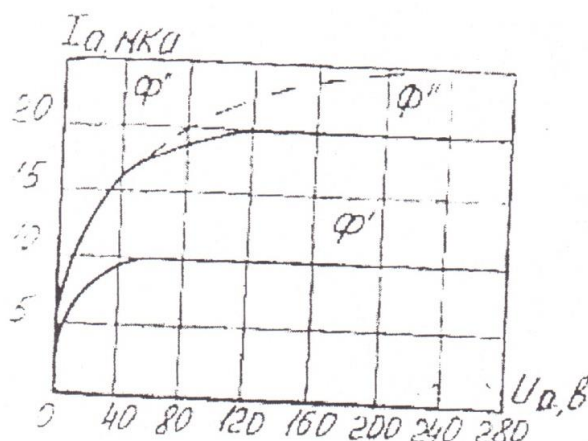


Рис. 10.5. Анодні характеристики вакуумного фотоелемента

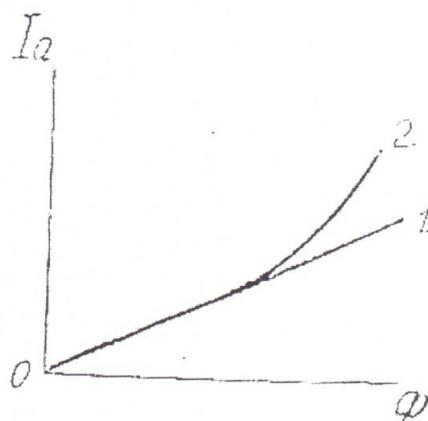


Рис. 10.6. Світлова характеристика фотоелемента

Нормальною світловою характеристикою є пряма лінія $I_a = K_\phi F$ за умови, що напругу на аноді взято досить великою для забезпечення режиму насичення. Такі прямолінійні характеристики від малих до дуже великих світлових потоків (крива 1 рис. 10.6) можуть бути отримані у вакуумних киснево-цезієвих фотоелементах і в сурм'яно-цезієвих фотоелементах з металевією підкладкою. В інших типах фотоелементів (в газонаповнених і вакуумних сурм'яно-цезієвих без металевієї підкладки) лінійність світлової характеристики має місце тільки при малих світлових потоках, при переході ж до великих світлових потоків в силу зазначених вище причин лінійність характеристики порушується, як це видно з кривої 2 рис. 10.6. Через те, що фотоелементи зазвичай використовуються для того, щоб без спотворень відтворити зміни величини світлового потоку в коливаннях електричного струму, то, очевидно, лінійність світлової характеристики є одним з основних вимог, пред'являються до фотоелементів.

Іонні фотоелементи

При наповненні фотоелемента інертним газом (гелієм, неоном і т. д.) з'являється можливість підвищити чутливість приладу шляхом використання несамостійного газового розряду.

На рис. 10.7 показана вольт-амперна характеристика іонного фотоелемента. Вона не має різко вираженої області насичення. Коли анодна напруга стає досить великою, в приладі виникає ударна іонізація газу і при подальшому збільшенні анодної напруги струм починає різко зростати, отже, чутливість фотоелемента збільшується.

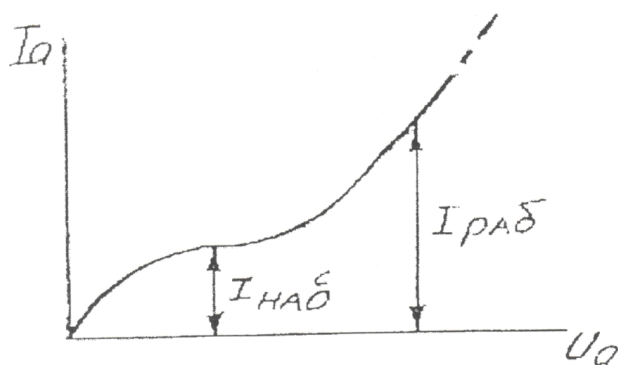


Рис. 10.7. Вольт-амперна характеристика іонного фотоелемента.

Чим вище анодна напруга, тим більше анодний струм, тим вище чутливість фотоелемента. Але допустиме збільшення анодного напруги обмежується небезпекою виникнення тліючого розряду, який призводить до втрати керування та до виходу катода з ладу. Відношення струму в допустимому робочому режимі $I_{раб}$ до струму насичення $I_{нас}$ (рис. 10.7) називається коефіцієнтом газового підсилення. Зазвичай він має величину порядку 5 – 8.

Недоліком газонаповнених фотоелементів є нелінійність їх світлової характеристики, обумовлена тим, що зі збільшенням анодного струму інтенсивність іонізації газу зростає і коефіцієнт газового підсилення стає більше. Інший важливий недолік у порівнянні з вакуумними фотоелементами полягає в суттєвій залежності чутливості від швидкості зміни світлового потоку, що виявляється вже на частотах

порядку одиниць кілогерц. Цей ефект викликаний тим, що процес встановлення газового розряду в приладі протікає порівняно повільно вже на відносно низькій частоті зміни світлового потоку струм не встигає заростати або спадати до значень, що відповідають сталому режиму.

На закінчення вкажемо на явище стомлюваності фотоелементів, що виявляється в тому, що в киснево-цезієвих фотоелементах, які мають порівняно велику чутливість при дуже малих світлових потоках, спостерігається швидке в часі зменшення чутливості фотоелемента при великих освітленостях. Відбувається це внаслідок недостатньо швидкого переходу електронів з шару окису цезію в мономолекулярний шар цезію, який при великих освітленостях втрачає багато електронів; якщо такий «стомлений» фотоелемент залишити у темряві, то він відновлює через деякий час свою чутливість. Крім стомлюваності, що є оборотним процесом, в киснево-цезієвих фотоелементах має місце незворотна втрата чутливості в процесі роботи: протягом перших 40 – 50 годин роботи чутливість цього фотоелемента зменшується в порівнянні з початковою на 70 – 75 %. В сурм'яно-цезієвих фотоелементах втрата чутливості значно менше: у продовження всього терміну служби фотоелемента (3000 – 4000 годин) чутливість зменшується тільки на 40 – 50 %, що є безперечною і вельми великою перевагою цих фотоелементів.

Фотоелектронні помножувачі

Внаслідок того, що фотострум електронних фотоелементів дуже малий, він потребує значного підсилення. Таке підсилення може бути ефективно досягнуте за допомогою вторинно-електронного множення, що і здійснюється в приладах, які називаються фотоелектронними помножувачами, які були розроблені вперше в 1930 р. Л.А. Кубецкім.

З цією метою електрони, що виходять з фотокатода (рис. 10.8) під дією світла, направляються електричним (чи магнітним) полем на електрод D_1 , який має значний коефіцієнт вторинної емісії δ і називається дінодом або емітером.

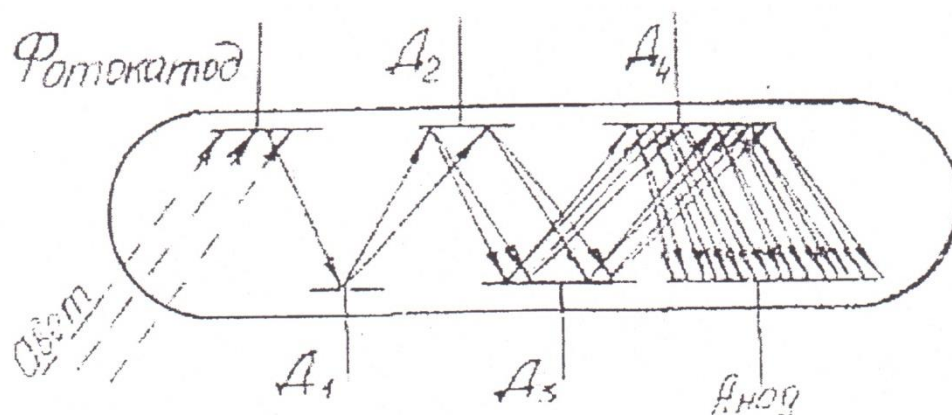


Рис. 10.8. Будова фотоелектронного помножувача.

Вибиті з дінода D_1 вторинні електрони прямують на наступний дінод D_2 , що має більш високий потенціал, і також вибивають з нього вторинні електрони в ще більшій кількості і т. д. Кожна із ступеней помноження дає підсилення фотоструму в γ раз, а загальне підсилення при n ступенях дорівнює: γ^n .

Наприклад, при $\gamma=10$ і при $n=10$ повинно забезпечуватися загальне посилення порядку 10^{10} .

Практично такий величезний коефіцієнт підсилення отримати не вдається через труднощі створення гарного фокусування променя, яке дозволяє направити весь потік електронів з одного електрода на інший без втрат. Позначивши коефіцієнт передачі струму від одного діноду на інший α і вважаючи його величину однаковою для всіх ступенів множення, отримаємо, що в цьому випадку загальний коефіцієнт підсилення

$$K_{\text{загал}} = 2^n \gamma^n. \quad (10.5)$$

Наприклад, при $\alpha = \frac{1}{2}$ та $n=10$ коефіцієнт підсилення виходить менше, ніж в ідеальному випадку у 2^{10} рази, тобто у 1024 рази. Зазвичай коефіцієнт передачі струму $\alpha = 0,44$.

Істотні труднощі є в отриманні високого і стабільного коефіцієнта вторинної емісії. Тому підсилення, що реально досягається, лежить в межах від декількох сот тисяч до десяти мільйонів.

Для отримання ефективного фокусування електронного потоку, що забезпечує високий коефіцієнт передачі струму, застосовуються як магнітне, так і електростатичне поле. Практично найбільшого поширення набуло електростатичне фокусування, що не вимагає важкої магнітної системи. Одна з поширених конструкцій показана на рис. 10.9. Електрони, що виходять з катода, фокусуються спеціальною діафрагмою і надходять на перший дінод, звідти на другий дінод і т.д. Діноди мають форму напівциліндрів. Конфігурація електричного поля при цьому така, що електронний потік майже повністю переходить від одного діноду до іншого і все більше концентрується. В останніх щаблях множення під впливом поля просторового заряду електронний потік починає розходитися, але коефіцієнт передачі струму залишається ще досить великим. З останнього дінода електрони надходять на анод (колектор).

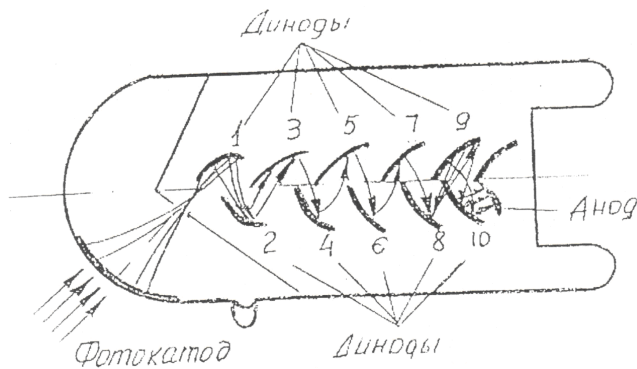


Рис. 10.9. Будова фотоелектричного помножувача з електростатичним фокусуванням.

Кількість ступенів множення зазвичай 8 – 12, але може доходити до 20. Напруга живлення залежить від кількості ступенів множення і лежить в межах від 750 до 2000 В.

Інтегральна чутливість фотопомножувача дорівнює добутку інтегральної чутливості фотокатода K_{Σ}' та коефіцієнту підсилення помножувача $K_{\text{загал}}$:

$$K_{\Sigma} = K_{\Sigma}' K_{\text{загал}}. \quad (10.6)$$

Інтегральна чутливість фотокатода має таку ж величину, як в електронних фотоелементах (20 – 00 мкА/лм) і при коефіцієнті посилення $K_{загал} = 10^6$ інтегральна чутливість помножувача доходить до 100 А/лм. Вихідний струм при цьому може мати величину до 10 мА. При збільшенні напруги живлення коефіцієнт підсилення і інтегральна чутливість помножувача ростуть внаслідок збільшення коефіцієнта вторинної емісії діодов.

Істотним недоліком помножувачів є зниження чутливості з часом, так зване старіння помножувача. Воно спостерігається протягом місяців і може призвести до зменшення чутливості на 20 – 25%. Основною причиною такого старіння є вплив залишкових газів на емісійні властивості фотокатода і емітерів.

Зниження чутливості помножувача може спостерігатися також у процесі роботи внаслідок втоми емітера на останніх щаблях через великі струмові навантаження. Таке зниження чутливості є оборотним процесом. Чутливість відновлюється після витримування помножувача в темряві. Емітери з металевих сплавів стомлюються значно менше сурм'яно-цезієвих і киснево-цезієвих. Темновим струмом I_T фото помножувача називають струм, що протікає в анодному ланцюзі приладу при увімкненій напрузі живлення та повністю затемненому фотокатоді. Причинами виникнення такого струму є: термоелектронна емісія фотокатода та емітера, струм витоку, автоелектронна емісія, іонний та оптичний обернений зв'язок

Термоелектронна емісія складає основну долю темного струму. При кімнатній температурі питома термоелектронна емісія сурм'яно-цезієвих фотокатодів складає величини порядку $10^{-14} - 10^{-15}$ А/см², а киснево-цезієвих – $10^{-12} - 10^{-13}$ А/см². Значно меншу термоемісію мають поверхні з активованих металевих сплавів.

Струми витоку протікають через ізоляцію між анодом та іншими електродами по зовнішній поверхні цоколя або скляної колби приладу, а також при утворенні плівок цезію на внутрішніх поверхнях ізоляторів за рахунок конденсації залишкових парів цезію на міжелектродних проміжках при виготовленні фотопомножувача.

Іноді в фотопомножувачах при великій різниці потенціалів між ступенями (понад 200 В) виникає холодна емісія з електродів. Для поверхонь з малою роботою

виходу ця емісія стає помітною вже при напруженості електричного поля порядку 10^5 В/см. Для усунення можливості виникнення таких полів поблизу країв і гострих кутів електродів краї електродів підгинають, а всі кути заокруглюють.

Іонний зворотній зв'язок в помножувачі може виникнути внаслідок того, що протікаючий між електродами струм іонізує атоми залишкового газу і парів цезію. Позитивні іони направляються до фотокатода і до перших щаблів помножувача, бомбардують їх і вибивають вторинні електрони, що створюють темновий струм. Тому при виготовленні фотопомножувача дуже важливо ретельне знегажування приладу. Оптичний зворотній зв'язок виникає внаслідок того, що електрони в області анода викликають люмінесценцію емітера і скла колби, яка, освітлюючи фотокатод, викликає емісію фотоелектронів з нього.

Темновий струм залежить від напруги живлення і температури фотопомножувача, зростаючи з їх підвищенням.

Фотоелектронні помножувачі широко застосовуються для реєстрації слабких світлових потоків.

Промисловістю випускається значна кількість типів фотоелектронних помножувачів, призначених для реєстрації слабких світлових потоків, для спектрального аналізу, для фотометрії, для реєстрації частинок в ядерній фізиці і т. д. Як приклад вкажемо параметри одного з них – ФЕУ29. Прилад має сурм'яно-цезієвий катод і, отже, область спектральної чутливості від 3000 до 6000 А. Кількість ступенів множення 13, фокусування електростатичне, напруга живлення 2300 В. Інтегральна чутливість 100 А/лм, темновий струм 0,06 мкА.

Програма роботи:

1. Зібрати схему для дослідження фотоелемента (рис. 10.10).
2. Зняти вольт-амперну характеристику вакуумного фотоелемента СЦВ-51.

$I_a = f(U_a)$ при двох постійних світлових потоках, що падають на катод.

ПРИМІТКА: світловий потік змінювати шляхом зміни відстані між лампою розжарювання і фотоелементом $l_1 = 20$ см; $l_2 = 40$ см.

3. Зняти світлові характеристики для двох анодних напруг $U_{a1}=150B$; $U_{a2}=240B$.
 $I_a = f(\Phi)$ вакуумного фотоелемента СЦВ-51.

4. Зняти характеристики, зазначені в пп. 2 і 3 для газонаповненого фотоелемента ЦГ-4.

ПРИМІТКА: Анодна напруга не повинна перевищувати 240 В.

5. Дані пп. 2, 3 і 4 занести в таблицю і побудувати графіки вольт-амперних і світлових характеристик вакуумного і газонаповненого фотоелементів.

6. Визначити інтегральну чутливість фотоелементів при $U_{a1}=150B$; $U_{a2}=240B$.

ПРИМІТКА: Для визначення світлового потоку, що падає на катод фотоелемента, необхідно користуватися формулою $\Phi = \frac{S}{l^2} \cdot I$, де I – сила світла лампи в міжнародних свічах (100 св.); S – площа катода в $см^2$ ($S_{вак}=9,6см^2$; $S_{газ}=5,6см^2$); l – відстань від лампи до катода фотоелемента в см.

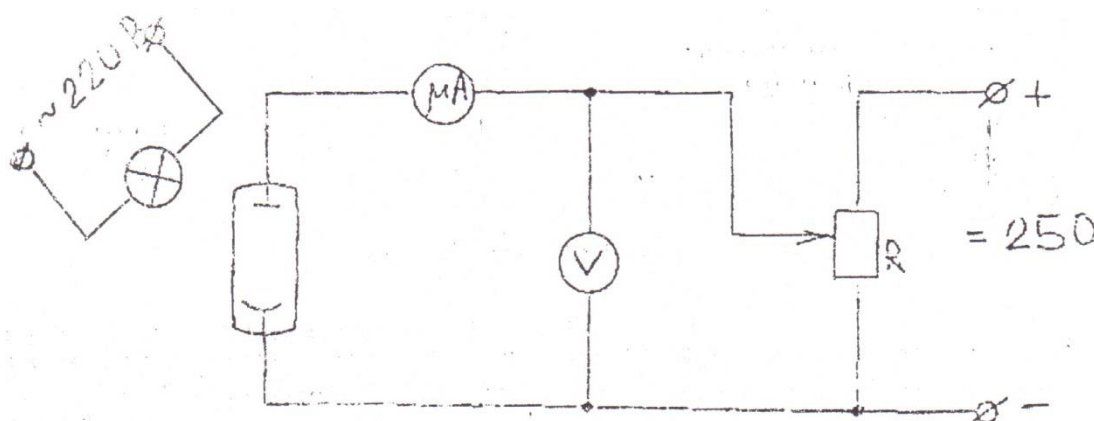


Рис. 10.10. Схема для дослідження фотоелемента.

Зміст звіту

1. Схема дослідження.
2. Таблиці та графіки.
3. Розрахунок чутливості.
4. Висновки.

Основні параметри фотоелементів із зовнішнім фотоэффектом

	СЦБ-4	СЦВ-51	ЦГ-3	ЦГ-4

Робоча напруга у В	240	240	240	240
Чутливість у мкА/лм	80	80	100	100
Максимальне значення темного струму в А	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Діаметр робочої площадки катода в мм	38	30	26	38

Контрольні запитання

1. Закони фотоемісії.
2. Будова фотоелементів.
3. Катоди, їх будова та технологія виготовлення.
4. Анодні і світлові характеристики для вакуумного і газонаповненого фотоелементів. Особливості.
5. Інтегральна і спектральна чутливості фотокатода. Від чого вони залежать?
6. Причини стомлюваності фотоелементів.
7. Будова і принцип дії ФЕП.
8. Інтегральна чутливість фотопомножувача.
9. Причини зниження чутливості.
10. Причини виникнення темного струму. Які складові темного струму Ви знаєте.
11. Що розуміють під струмом оптичного та іонного зворотного зв'язку?
12. Назвіть основні області застосування ФЕП.

[12 (676 – 684 с., 692 – 698 с.), 15 (307 – 314 с.), 16]

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Каганов И.Л. Ионные приборы. – М.: Энергия, 1972.

2. Соболев В.Л. Физические основы электронной техники. – М.: Высш.шк., 1979.
3. Генис А.А. Приборы тлеющего разряда. – К.: Гостехиздат УССР, 1963.
4. Капцов Н.А. Электроника. – М.: Гостехиздат, 1963.
5. Генис А.А., Горнштейн И.Л. Приборы тлеющего разряда. – К.: Техніка, 1970.
6. Фогельсон Т.Б., Бреусова Л.Н. Импульсные водородные тиратроны. – М.: Сов.радио, 1974.
7. Газоразрядная индикаторная панель с самосканированием / А.Д. Князев, А.Б. Покрывайло, В.Г.Самородов, А.Я.Скоз // Электронная техника. – Сер. 4. – Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1976. – вып. 8.
8. Яблонский Ф.М. Газоразрядные приборы для отображения информации. – М.: Энергия, 1979,
9. Самородов В.Г. Газоразрядная индикаторная панель с самосканированием и подготовка зажигания // Обзоры по электронной технике. – Сер. 4. – Вып. 4. – М., 1979.
10. Батушев В.А. Электронные приборы. – М.: Высш. шк., 1980. – 382 с.
11. Дулин В.Н. Электронные и ионные приборы. – М.: ГЭИ, 1977. – 324 с.
12. В.Ф.Власов. Электронные и ионные приборы, М.: Связь, 1960. – 286 с.
13. Гурлев Д.С. Справочник по электронным приборам. -К.: Техніка, 1979. - 245 с.
14. Шерстнев Л.Г. Электронно-лучевые приборы. – М.: Энергия, 1975. – 322 с.
15. Бочаров Л.Н. Электронные приборы. М. Энергия, 1979.
16. Соболева Н.А., Меламед А.Е. Фотоэлектронные приборы, 1974.